

# OTIMIZAÇÃO DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS COM RECURSO A REDES NEURONAIS ARTIFICIAIS

Joana Filipa Marques Costa Brandão

Relatório de estágio submetido para obtenção do grau de  
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL/RAMO INFRAESTRUTURAS  
E AMBIENTE

Orientador: Professor Jaime Gabriel Silva

PORTO

OUTUBRO 2014



## AGRADECIMENTOS

No término desta etapa de estágio, fica o agradecimento a todas as pessoas que, direta ou indiretamente, me ajudaram nesta caminhada tão importante da minha vida pessoal e profissional.

Ao orientador Eng.º Gabriel Silva, gostaria de agradecer a oportunidade que me foi concedida de realizar o Estágio na organização prestigiada que é a SIMRIA - Saneamento Integrado dos Municípios da Ria, SA. Bem como toda a disponibilidade prestada ao longo do estágio na compreensão do *software* e na realização do relatório.

Ao co-orientador Eng.º Milton Fontes, agradeço a orientação que sempre prestou, durante a realização do estágio e na elaboração do presente relatório.

À co-orientadora Dr.<sup>a</sup> Margarida Esteves, um especial agradecimento por todo o apoio prestado durante o período de estágio, nomeadamente dados disponibilizados para a concretização do trabalho, por toda a atenção, orientações, ajuda no relatório e por todo o *know how* e experiência transmitidos.

Aos restantes colaboradores da SIMRIA, em particular da ETAR Norte, pela simpatia com que me acolheram durante o período de estágio permitindo uma rápida e fácil integração.

Aos amigos e colegas de curso, pela amizade, pela compreensão e por muito contribuírem para o meu crescimento profissional.

À minha família, por me dar a oportunidade de realizar um grande objetivo pessoal, pelo apoio incondicional prestado, por estarem presentes ao meu lado em todos os momentos neste trabalho e sem a qual dificilmente conseguiria chegar até aqui.

Obrigada.

## RESUMO

**Palavras-chave:** estações de tratamento de águas residuais, digestão anaeróbia, biogás, redes neurais artificiais.

Numa Estação de Tratamento de Águas Residuais (ETAR), são elevados os custos não só de tratamento das águas residuais como também de manutenção dos equipamentos lá existentes, nesse sentido procura-se utilizar processos capazes de transformar os resíduos em produtos úteis. A Digestão Anaeróbia (DA) é um processo atualmente disponível capaz de contribuir para a redução da poluição ambiental e ao mesmo tempo de valorizar os subprodutos gerados.

Durante o processo de DA é produzido um gás, o biogás, que pode ser utilizado como fonte de energia, reduzindo assim a dependência energética da ETAR e a emissão de gases com efeito de estufa para a atmosfera. A otimização do processo de DA das lamas é essencial para o aumento da produção de biogás, mas a complexidade do processo constitui um obstáculo à sua otimização.

Neste trabalho, aplicaram-se Redes Neurais Artificiais (RNA) ao processo de DA de lamas de ETAR. RNA são modelos simplificados inspirados no funcionamento das células neuronais humanas e que adquirem conhecimento através da experiência. Quando a RNA é criada e treinada, produz valores de *output* aproximadamente corretos para os *inputs* fornecidos. Foi esse o motivo para recorrer a RNA na otimização da produção de biogás no digestor I da ETAR Norte da SIMRIA, usando o programa NeuralTools™ da Palisade™ para desenvolvimento das RNA. Para tal, efetuou-se uma análise e tratamento de dados referentes aos últimos quatro anos de funcionamento do digestor. Os resultados

obtidos permitiram concluir que as RNA modeladas apresentam boa capacidade de generalização do processo de DA.

Considera-se que este caso de estudo é promissor, fornecendo uma boa base para o desenvolvimento de modelos eventualmente mais gerais de RNA que, aplicado conjuntamente com as características de funcionamento de um digestor e o processo de DA, permitirá otimizar a produção de biogás em ETAR.

## ABSTRACT

**Keywords:** wastewater treatment, anaerobic digestion, biogas, artificial neural networks seasons.

In a Wastewater Treatment Station (WWTP), Anaerobic Digestion (AD) is process for sludge stabilization and volume reduction. The digestate, under certain conditions, that is if they meet the specific parameters, can be used in agriculture.

During the AD, a gas is produced, biogas, process which can be used as an energy source, thereby reducing the energy dependency of the treatment plant and reducing the emissions of greenhouse gases into the atmosphere. The optimization process of AD sludge is essential for increasing biogas production, but the complexity of the process is an obstacle to its optimization.

In this work assignment, Artificial Neural Networks (ANN) were applied to the AD of WWTP sludge. ANN are simplified models inspired by the functioning of human neuronal cells that acquire knowledge through experience. This method uses numerical *inputs* to make calculations and generate one or more numeric values based on these *inputs*. When ANN is created and trained for a specific application, it produces approximately correct *outputs* for the provided *inputs*. This was the reason for resorting to RNA in the optimization of biogas production in the WWTP Digester I North SIMRIA using the NeuralTools™ Palisade™ program for development of the ANN. In this sense, an analysis and data processing were performed regarding the last four operational years of the digester. The results showed that the ANN modeled presented good generalization ability of the AD process.

This case study is considered promising, providing a good basis for the development of more general models of ANN that, when applied in conjunction with the operating characteristics of a digester and the AD process, will allow the optimization of biogas production in WWTP.

## ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS.....	iii
RESUMO .....	iv
ABSTRACT.....	vi
ÍNDICE GERAL.....	viii
ÍNDICE DE FIGURAS .....	xiv
ÍNDICE DE TABELAS.....	xvii
LISTA DE ABREVIATURAS .....	xviii

### Capítulo 1.

INTRODUÇÃO .....	1
1.1. Âmbito do trabalho .....	1
1.2. Objetivos.....	2
1.3. Enquadramento do tema.....	2

### Capítulo 2.

EMPRESA.....	6
2.1. AdP .....	6
2.2. SIMRIA .....	9
2.2.1. Acionistas.....	10
2.2.2. Cadeia de Valor.....	11
2.2.3. Síntese de Indicadores .....	11
2.2.4. O Sistema Multimunicipal.....	12
2.2.5. Estrutura Organizacional .....	16
2.2.6. Direção de Operação e Infraestruturas (DOI).....	16
2.2.7. Direção Administrativa e Financeira (DAF).....	17
2.2.8. Funcionamento da Empresa .....	17



2.2.9.	Relações com Stakeholders .....	18
--------	---------------------------------	----

### Capítulo 3.

<b>ETAR NORTE.....</b>	<b>21</b>
3.1. ETAR Norte .....	21
3.2. Linha de tratamento.....	23
3.2.1. Linha de tratamento da fase líquida (linha de água):.....	23
3.2.2. Linha de tratamento da fase sólida (linha de lamas):.....	24
3.3. Descrição das Instalações e Órgãos .....	25
3.3.1. Gradagem de sólidos finos .....	25
3.3.2. Desarenador-desengordurador.....	26
3.3.2.1. Desarenador-desengordurador com arejamento .....	26
3.3.2.2. Extração e separação de areias .....	27
3.3.2.3. Extração e separação de óleos e escumas.....	28
3.3.3. Medição do caudal de água pré-tratada.....	29
3.3.4. Decantação primária .....	30
3.3.4.1. Repartição para os decantadores.....	30
3.3.4.2. Decantadores primários.....	31
3.3.5. Tratamento biológico .....	32
3.3.5.1. Repartição entre reatores e “by-pass” .....	32
3.3.5.2. Reator biológico.....	33
3.3.5.3. Turbinas de arejamento .....	34
3.3.5.4. Lamas a recircular e lamas em excesso.....	35
3.3.6. Decantação secundária .....	36
3.3.6.1. Repartição do caudal de entrada nos decantadores .....	36
3.3.6.2. Decantadores secundários.....	37

3.3.7.	Medição do caudal de água pré-tratada.....	39
3.3.8.	Tratamento das lamas.....	39
3.3.9.	Espessamento das lamas.....	41
3.3.9.1.	Câmara de mistura das lamas primárias e biológicas em excesso .....	42
3.3.9.2.	Espessadores de lamas mistas .....	43
3.3.9.3.	Bombagem para a digestão das lamas mistas espessadas.....	43
3.3.10.	Digestão anaeróbia.....	44
3.3.10.1.	Digestor primário.....	45
3.3.10.2.	Digestor secundário.....	46
3.3.10.3.	Linha de gás.....	47
3.3.10.4.	Dessulfurização .....	47
3.3.10.5.	Aquecimento das lamas.....	48
3.3.11.	Desidratação das lamas.....	49
3.3.11.1.	Filtros banda.....	49
3.3.11.2.	Armazenamento das lamas .....	51
3.3.12.	Instrumentação e controlo.....	52
3.3.12.1.	Elementos de controlo.....	52
3.4.	Acompanhamento da empresa.....	54

## **Capítulo 4.**

<b>DIGESTÃO ANAERÓBIA .....</b>	<b>56</b>
4.1.	Processo de degradação anaeróbio .....
4.1.1.	Hidrólise.....
4.1.2.	Acidogénese.....
4.1.3.	Acetogénese.....
4.1.4.	Metanogénese .....

4.1.5.	Sulfidogénese .....	62
4.2.	Fatores ambientais que interferem com o processo .....	63
4.2.1.	Temperatura.....	64
4.2.2.	Tempo de Retenção Hidráulico (TRH).....	65
4.2.3.	pH.....	66
4.2.4.	Alcalinidade.....	66
4.2.5.	Agitação.....	67
4.2.6.	Requisitos nutricionais .....	68
4.2.6.1.	Macronutrientes.....	68
4.2.6.2.	Micronutrientes .....	69
4.2.7.	Toxicidade e inibição .....	69
4.2.7.1.	Amónia .....	70
4.2.7.2.	Sulfuretos .....	71
4.2.7.3.	Ácidos Gordos Voláteis (AGV).....	72
4.2.7.4.	Metais pesados.....	72
4.2.7.5.	Metais alcalinos e alcalino-terrosos.....	73
4.3.	Tipos de reatores anaeróbios .....	74
4.3.1.	Reator de mistura completa .....	74
4.3.2.	Reator de contacto.....	75
4.3.3.	Reator anaeróbio descontínuo sequencial.....	76
4.3.4.	Reator de filtro anaeróbio.....	77
4.3.5.	Reator de leito fluidizado/leito expandido .....	78
4.3.6.	Reator de manto de lamelas de fluxo ascendente (UASB) .....	79
4.3.7.	Reator anaeróbio com anteparas.....	80
4.3.8.	Digestão Anaeróbia em duas faces .....	81

## Capítulo 5.

<b>REDES NEURONAIS ARTIFICIAIS .....</b>	<b>83</b>
5.1. Evolução histórica .....	83
5.2. Neurónio Biológico.....	85
5.3. Neurónio Artificial.....	87
5.4. RNA .....	88
5.4.1. Estrutura de uma RNA.....	88
5.4.2. Arquitetura .....	90
5.4.3. Aprendizagem (treino) .....	91
5.4.4. Modelos de redes neuronais .....	92
5.4.4.1. Percepção.....	92
5.4.4.2. Percepção multicamada.....	93
5.4.5. Tipos de RNA .....	94
5.4.5.1. Redes multi-layer feedforward .....	95
5.4.5.2. Redes neuronais de regressão generalizada (GRNN) .....	97
5.4.5.3. Redes Neuronais Probabilísticas (PN).....	98
5.4.6. Comparação entre redes MLF e PN/GRN.....	99
5.5. Fases de resolução dos problemas de predição com recurso a RNA.....	99
5.5.1. Preparação dos dados.....	99
5.5.2. Treino RNA .....	100
5.5.3. Teste RNA .....	101
5.5.4. Previsão .....	101
5.6. Razões da aplicação das RNA .....	102

## Capítulo 6.

<b>CASO EM ESTUDO .....</b>	<b>105</b>
-----------------------------	------------

6.1.	Enquadramento .....	105
6.1.1.	1ª Fase – Preparação dos dados.....	106
6.1.2.	2ª Fase – Recolha de dados .....	107
6.1.3.	3ª Fase – Tratamento de dados .....	110
6.1.3.1.	Dificuldades no tratamento de dados .....	112
6.1.4.	4ª Fase – Correções.....	113
6.1.5.	5ª Fase – Treino e teste de RNA .....	114
6.1.5.1.	Treino de RNA.....	114
6.1.5.2.	Teste de RNA.....	115
6.1.5.3.	Relatórios e gráficos do NeuralTools .....	118
6.1.6.	6ª Fase - Previsão .....	119
6.1.7.	7ª Fase - Normalização.....	120
<b>Capítulo 7.</b>		
<b>CONCLUSÕES.....</b>		<b>122</b>
<b>Capítulo 8.</b>		
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>		<b>126</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Abastecimento água e saneamento de águas residuais (Fonte: AdP,2014).....	8
Figura 2 - Estrutura acionista da empresa (Fonte: Relatório e Contas 2013). ....	10
Figura 3 - A cadeia de valor associada a atividade chave da empresa (Fonte: Relatório e Contas 2013). ....	11
Figura 4 - Principais indicadores da atividade e de gestão da SIMRIA no triénio 2011/2013 (Fonte: Relatório e Contas 2013).....	12
Figura 5 – Sistema Multimunicipal de Saneamento da Ria de Aveiro (Fonte: Relatório e Contas 2013). ....	13
Figura 6 – Estrutura organizacional da SIMRIA (Fonte: Relatório e Contas 2013). ....	16
Figura 7 – Ciclo PDCA (Fonte: Relatório e Contas 2013). ....	17
Figura 8 – Stakeholders da SIMRIA (Fonte: Relatório e Contas 2013). ....	19
Figura 9 – Localização da ETAR Norte (Fonte: Documentação da ETAR). ....	22
Figura 10 – Estação de Tratamento de Águas Residuais Norte (Fonte: Documentação da ETAR). ....	22
Figura 11 - Diagrama Funcional/Linha de Tratamento (Fonte: Documentação da ETAR). ....	23
Figura 12 – Gradagem dos sólidos finos.....	26
Figura 13 – Desarenador-desengordurador.....	27
Figura 14 – Classificador de areias.....	28
Figura 15 – Recolha de gorduras.....	29
Figura 16 - Canal Parshall.....	30
Figura 17 – Câmara de repartição da água pré-tratada.....	30
Figura 18 – Decantadores primários.....	32
Figura 19 – Reator biológico.....	33

Figura 20 – Turbina de arejamento.....	35
Figura 21 – Decantador secundário. ....	38
Figura 22 – Decantador Secundário vazio com o sistema de recolha de lamas por aspiração visível.     39	
Figura 23 – Espessador de Lamas. ....	42
Figura 24 – Digestores Primários. ....	45
Figura 25 – Digestor secundário com gasómetro. ....	46
Figura 26 – Queima do gás em excesso na flare (tocha). ....	47
Figura 27 – Filtros banda. ....	51
Figura 28 – Silo de armazenamento das lamas.....	51
Figura 29 – Esquema com as várias fases do processo e os produtos formados durante a Digestão Anaeróbia (Fonte: Silveira, 2009).....	58
Figura 30 – Reator de mistura completa (Fonte: Silveira, 2009). ....	75
Figura 31 – Reator de contacto (Fonte: Silveira, 2009). ....	76
Figura 32 – Reator anaeróbio descontínuo sequencial (Fonte: Silveira, 2009). ....	76
Figura 33 - Reator de filtro anaeróbio (Fonte: Silveira, 2009). ....	78
Figura 34 - Reator de leito fluidizado (Fonte: Silveira, 2009). ....	79
Figura 35 - Reator de manto de lamas de fluxo ascendente (UASB) (Fonte: Silveira, 2009).     .....	80
Figura 36 - Reator anaeróbio com anteparas (também designado reator fluxo-pistão) (Fonte: Silveira, 2009). ....	81
Figura 37 - Digestão anaeróbia em duas fases (Fonte: Silveira, 2009). ....	82
Figura 38 - Diagrama de um neurónio (Fonte: Härter, 2004).....	87
Figura 39 - Esquema de um neurónio artificial (Fonte: Härter, 2004). ....	88
Figura 40 – Modelo de um nó de uma RNA (Fonte: Matos,2008). ....	89

Figura 41 – Representação esquemática de um perceptron (Fonte: Silva, 2013).....	92
Figura 42 - Esquema PMC (Fonte: Silva, 2013).....	93



## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Tabela Resumo com as características de cada Fase do Sistema Multimunicipal (Fonte: Relatório e Contas 2013).....	15
Tabela 2 - Dados relativos ao horizonte de projeto de cada uma das instalações em exploração (Fonte: Relatório e Contas 2013). ....	15

## LISTA DE ABREVIATURAS

AGV - Ácidos gordos voláteis

AGCL - Ácidos gordos de cadeia longa

BA - Bactérias acetogénicas

BAPH - Bactérias acetogénicas produtoras de hidrogénio

BF - Bactérias fermentativas

BM - Bactérias metanogénicas

BMA - Bactérias metanogénicas acetoclásticas

BMH - Bactérias metanogénicas hidrogenotróficas

BH - Bactérias hidrolíticas

BHA - Bactérias homoacetoclásticas

BRS - Bactérias redutoras de sulfatos

BRSH - Bactérias redutoras de sulfatos hidrogenotróficas

BRSA - Bactérias redutoras de sulfatos acetotróficas

CBO - Carência bioquímica de oxigénio

CQO - Carência química de oxigénio

DA - Digestão anaeróbia

ETAR - Estação de Tratamento de Águas Residuais

LM - Lamas mistas

Q - Caudal

SS - Sólidos suspensos

SST - Sólidos suspensos totais

SSV - Sólidos suspensos voláteis

ST - Sólidos totais

SV - Sólidos voláteis

TRH - Tempo de retenção hidráulico

TRS - Tempo de retenção de sólidos

V - Volume



## Capítulo 1.

## INTRODUÇÃO

### 1.1. Âmbito do trabalho

O presente relatório apresenta o trabalho realizado no âmbito da cadeira de DIPRE – Dissertação/Projeto/ Estágio, através de um Estágio Curricular realizado em ambiente empresarial, do Mestrado em Engenharia Civil/ Ramo de Infraestruturas e Ambiente, do Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP). O estágio decorreu na empresa SIMRIA - Saneamento Integrado dos Municípios da Ria, SA, em Aveiro, entre 10 de Fevereiro e 31 de Julho de 2014 com o tema: “Otimização da Produção de Biogás com recurso a Redes Neurais Artificiais” e com desenvolvimento na ETAR Norte da empresa.

A proposta do tema pela empresa vem na sequência de um estágio efetuado na ETAR Sul, no ano letivo 2012/2013, por outro aluno do Mestrado em Engenharia Civil do ISEP - Hélder Rocha. Os bons resultados alcançados, nesse estágio, foram motivo para a empresa entender como adequado seguir a mesma experiência de aplicação da metodologia anteriormente usada, desta vez na ETAR Norte, localizada em Cacia.

Para o desenvolvimento dos cálculos do presente trabalho utilizaram-se os programas Microsoft Excel™, da Microsoft, e NeuralTools™, da Palisade, que se encontram disponíveis na empresa SIMRIA.

Pretendeu-se, assim, compilar um conjunto de ferramentas e procedimentos, que aplicadas numa ordem lógica facilitassem e estruturassem o tratamento, a preparação dos dados, o treino de RNA e a análise de resultados obtidos.

## 1.2. Objetivos

Os objetivos do presente estudo podem ser sintetizados nos seguintes aspetos:

- O estudo e identificação das principais variáveis responsáveis pelo processo de DA, estabelecendo uma hierarquização entre estas;
- A análise da adequação da aplicação de RNA à otimização da produção de biogás do digestor I da ETAR Norte da SIMRIA.

No que se refere ao primeiro aspeto, pretende-se com este relatório procurar compreender as RNA e a sua utilização, discutindo-se a diversidade, as propriedades e as aplicações destes modelos. Assim, procurou-se identificar e justificar as opções tomadas na construção das RNA, aplicando e desenvolvendo metodologias de otimização, pesquisando caminho para estudos futuros e cumprindo o segundo objetivo deste trabalho.

O segundo aspeto referido tem aplicação mais orientada para o planeamento. Devido à escassez de dados ou, simplesmente, à carência de ferramentas adequadas ao seu tratamento, desconhece-se, em profundidade, qual a relação entre o volume de biogás produzido e as variáveis intervenientes num processo de DA. Sabe-se, por exemplo, que o volume de biogás produzido cresce com o aumento da carga aplicada e da temperatura no digestor. No entanto, devido à quantidade de variáveis intervenientes e à complexidade do processo, a análise estatística tradicional não oferece as respostas necessárias.

## 1.3. Enquadramento do tema

Como refere Mavioso (2010), o desenvolvimento das sociedades modernas conduz a uma produção crescente de resíduos poluentes, lado a lado com um aprofundamento da noção de finitude dos recursos hídricos. A degradação dos recursos hídricos atuais, sejam superficiais ou subterrâneos, pode agravar-se por efeito das águas residuais, bem como acelerar a escassez dos mesmos. As águas residuais produzidas nas habitações, comércio e

indústria são geradoras de diferentes tipos de poluição e em função da sua proveniência, estes efluentes acabarão, no seu conjunto, por ter um impacto ambiental negativo se não forem adequadamente recolhidos e tratados. A recolha de águas residuais efetua-se através de uma rede de coletores que as encaminha, para as ETAR. Nas ETAR, as águas residuais sofrem vários processos de correção das suas características de modo a que o efluente tratado esteja preparado para a descarga no meio recetor, de acordo com os critérios e normas de qualidade da água legislados, com a finalidade de proteger, preservar e melhorar a água em função dos seus principais usos. A descarga não controlada de águas residuais sem tratamento no meio recetor provoca alterações físicas, químicas e biológicas, como seja o aumento da concentração de poluentes e riscos acrescidos para a saúde pública.

A interdependência dos setores da água e energia, bem como as suas relações com o crescimento demográfico e as alterações climáticas, entre outras questões ambientais, tornam urgente a otimização sustentável dos sistemas de tratamento de águas, sejam elas para consumo humano ou para outros usos (Mavioso,2010).

De acordo com Silveira (2009), as energias renováveis têm estado, nos últimos anos, em franca expansão devido à urgência de implementação de soluções alternativas que minimizem a dependência dos países relativamente aos combustíveis fósseis, e a urgência em combater o fenómeno do “aquecimento global”, reduzindo as emissões de gases com efeito de estufa. Atualmente existe uma preocupação associada à adequabilidade das fontes de combustível, do custo da energia e dos níveis de tratamento crescentes que são exigidos, dos quais resultam consumos energéticos superiores. Consequentemente, o dimensionamento e a operação das ETAR modernas estão cada vez mais focalizados na maximização da eficiência do uso da energia elétrica e na redução dos custos de tratamento.

Como mencionado em Pires (2009), existe assim a necessidade de se encontrarem processos capazes de transformar os resíduos em produtos úteis. A estabilização anaeróbia da matéria orgânica é uma das tecnologias atualmente disponíveis, capaz de contribuir para a redução da poluição ambiental e ao mesmo tempo de valorizar os subprodutos gerados.

A DA é um processo microbiológico que, em condições de ausência de oxigênio, permite transformar a matéria orgânica em metano, ocorrendo em diversos meios naturais tais como sedimentos, fontes termais e sistemas gastrointestinais, e em ambientes controlados como é o caso dos digestores anaeróbios. Silveira (2009) refere que DA é descrita muitas vezes como um processo instável. No entanto, os avanços verificados nos últimos 20 anos na compreensão da bioquímica e energética do processo contribuíram para o desenvolvimento do conhecimento das fases mais sensíveis do processo, assim como de estratégias que permitiram aumentar a estabilidade dos reatores anaeróbios, proporcionando uma maior retenção de biomassa por adesão a suportes, granulação ou reciclagem da biomassa em reatores de alta carga. O processo de DA apresenta, de um modo geral, claras vantagens para o tratamento de resíduos orgânicos. No entanto, os benefícios que resultam da sua aplicação estão dependentes da boa operacionalidade e controlo rigoroso do processo.

De acordo com Silveira (2019), o biogás produzido durante o processo de DA tem um potencial energético muito elevado, adequado para a produção de eletricidade e calor. Com a produção de energia a partir do biogás é possível diminuir a fatura energética das ETAR e reduzir a emissão de gases com efeito de estufa. O armazenamento do biogás permite que se possa fazer a gestão da energia gerada consoante as necessidades do processo, aproveitando o calor gerado para o aquecimento de digestores e em infraestruturas que até então utilizavam energia elétrica para o aquecimento, ou nos casos



de venda à rede pública, maximizar a energia produzida nas horas de maior consumo, obtendo assim maiores contrapartidas financeiras (Moreira, 2013).

Deste modo, a biomassa apresenta-se como uma fonte de energia renovável bastante viável devido à sua enorme disponibilidade, possuindo um papel crucial na redução da concentração do  $\text{CO}_2$  atmosférico. A energia libertada durante a combustão do gás metano pode substituir a das principais fontes de energia atuais associadas a utilização de combustíveis fósseis, caracterizadas por um ciclo de carbono com uma escala temporal de milhares de anos. Pires (2009) recorda, que foi no século XIX que começou o interesse neste gás e nos dias de hoje é considerado uma forma de energia alternativa em forte expansão. Se todos os resíduos mundiais fossem convertidos em metano, a uma eficiência de 50%, seria possível uma economia de 5% na energia fóssil mundial.

## Capítulo 2.

## EMPRESA

Ao longo deste capítulo será feita uma breve apresentação do grupo Águas de Portugal, das empresas que o constituem, em especial da empresa SIMRIA, na qual foi feito o estágio. Apresentar-se-á a estrutura acionista, o sistema multimunicipal e a estrutura organizacional da SIMRIA.

### 2.1. AdP

A Águas de Portugal (AdP) foi constituída em 1993, ao abrigo do direito comercial privado com acionistas públicos, tendo como prioridade o desenvolvimento dos sistemas multimunicipais de abastecimento de água e de saneamento de águas residuais, no sentido de ultrapassar a fragmentação que caracterizava aqueles setores, condição necessária para a evolução pretendida. À data, registava-se um único caso em que os serviços não se encontravam confinados aos limites administrativos de um determinado concelho: a EPAL, empresa centenária que então fornecia água a cerca de 20 municípios da área da Grande Lisboa e que é hoje uma das unidades de negócio do grupo AdP.

Em 2000, as participações do estado português na área do ambiente foram integradas no grupo AdP, nomeadamente a Empresa Geral do Fomento (EGF) enquanto sub-holding para o tratamento e valorização de resíduos sólidos urbanos, que se constituiu como uma nova unidade de negócios do Grupo. Com a criação dos sistemas multimunicipais nos domínios do abastecimento de água, do saneamento de águas residuais e do tratamento e valorização de resíduos sólidos urbanos, reuniram-se as condições de base para a AdP levar por diante a sua missão em termos de melhoria das condições ambientais e de saúde pública.

Recentemente verificou-se a necessidade de reformular o modelo institucional com base no qual se constituíram os sistemas multimunicipais. Foi assim definido e legalmente aprovado um novo modelo organizativo para os serviços de águas e resíduos, assente na celebração de contratos de parceria entre o Estado e as autarquias locais, modelo esse que foi adotado para a criação de duas novas empresas em 2009.

Integrando o setor empresarial do Estado, o grupo AdP agrega hoje mais de 40 empresas que atuam nos domínios do abastecimento de água, do saneamento de águas residuais e do tratamento e valorização de resíduos sólidos. O universo do Grupo inclui uma unidade de serviços partilhados, que apoia as empresas operacionais em diversas áreas como as compras e a engenharia, e uma empresa de tecnologias de informação, que desenvolve e implementa soluções técnicas ajustadas às necessidades de gestão técnica, exploração e manutenção dos sistemas de águas, saneamento e resíduos. A partilha da experiência e manutenção dos sistemas de águas, saneamento e resíduos.

Com o objetivo de maximizar o aproveitamento dos ativos e dos recursos endógenos, contribuindo assim para o desenvolvimento sustentável, o grupo AdP encontra-se também a desenvolver atividades relevantes no domínio das energias renováveis.

O grupo AdP assume um papel de grande contribuidor para os objetivos operacionais dos planos estratégicos sectoriais do País, os quais nos domínios de abastecimento de água e de saneamento de águas residuais são servir cerca de 95% da população com sistemas públicos de abastecimento de água e cerca de 90% da população com sistemas públicos de saneamento de águas residuais urbanas e no domínio do tratamento e valorização de resíduos se materializam na implementação de um novo modelo de gestão sustentada de resíduos que visa a redução da deposição de resíduos em aterro e o aumento das recolhas seletivas de materiais de embalagem e de resíduos urbanos biodegradáveis.

O reconhecimento das potencialidades da experiência empresarial desenvolvida motivou a crescente adesão dos municípios ao estabelecimento de parcerias com a AdP para a gestão integrada de serviços públicos de água, saneamento e resíduos. Hoje, as empresas do grupo AdP assumem já a responsabilidade pela prestação do serviço público nos domínios do abastecimento de água e do saneamento de águas residuais a mais de 230 municípios, num total de 308. No domínio do tratamento e valorização de resíduos, o número de municípios envolvidos é superior a 170.

O grupo AdP participa num conjunto de empresas que, em parceria com os municípios, prestam serviços a cerca de 80% da população portuguesa.

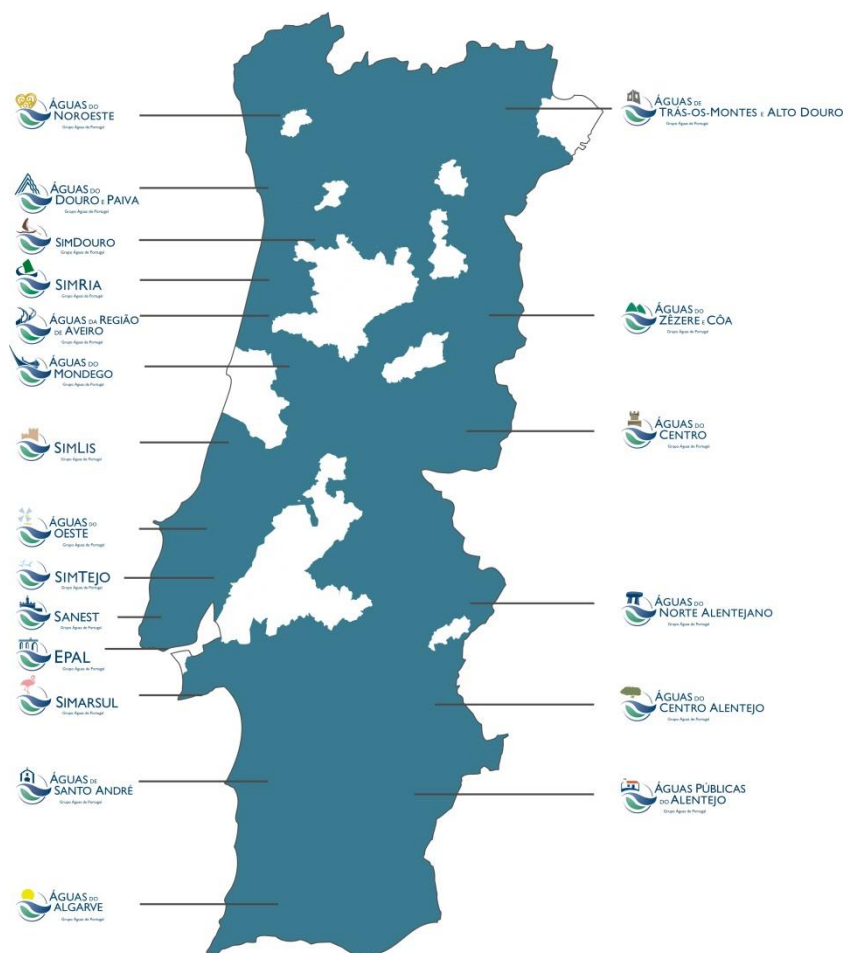


Figura 1 - Abastecimento água e saneamento de águas residuais (Fonte: AdP,2014).

## 2.2. SIMRIA

A SIMRIA - Saneamento Integrado dos Municípios da Ria, SA, é a sociedade anónima responsável pela construção, gestão e exploração do Sistema Multimunicipal de Saneamento da Ria de Aveiro, criado através do Decreto-Lei nº 101/97, de 26 de Abril, com o objetivo de obter uma solução conjunta para a coleta, tratamento e destino final dos efluentes gerados na zona de abrangência da Ria de Aveiro. Em conformidade com o disposto no Decreto-Lei 329/2000 de 22 de dezembro, a intervenção da SIMRIA ao nível de requalificação ambiental, foi ampliada ao Município de Espinho e foi continuada em Santa Maria da Feira e parte de Ovar, no sentido de dar resposta à recuperação do ecossistema da Barrinha de Esmoriz/ Lagoa de Paramos. A 19 de janeiro de 2009 foi celebrado o 2º Aditamento ao Contrato de Concessão que prolongou o período da concessão para 50 anos e ampliou a área de intervenção a Sul, aos Municípios de Oliveira do Bairro e Cantanhede. Nos termos do Despacho n.º 9976/2010 do Ministério do Ambiente e do Ordenamento do Território, publicado no Diário da República de 14 de junho de 2010, foi feito o alargamento geográfico do Sistema Multimunicipal da Ria de Aveiro à totalidade do município de Vagos.

A SIMRIA tem implementado um Plano de Controlo Analítico, cuja elaboração teve por base o controlo dos afluentes ao sistema, o controlo do processo de tratamento das ETAR e o cumprimento da legislação, no que diz respeito aos Alvarás de Utilização de Domínio Hídrico. Este programa de monitorização ambiental tem uma componente cuja atividade é desenvolvida pelo Laboratório da SIMRIA, situado na ETAR Sul, e tem uma componente desenvolvida por laboratórios exteriores acreditados. Dentro desta última componente, inclui-se a avaliação da qualidade das águas balneares na zona de influência dos emissários submarinos.

A SIMRIA atua promovendo a requalificação ambiental dos ecossistemas num quadro de sustentabilidade económica, financeira e social. A sua atividade configura, assim, um serviço de interesse geral, com um papel determinante na melhoria da qualidade de vida dos cidadãos e na garantia da coesão económica e social da região, estando sujeita a um conjunto de obrigações de serviço público que importa salientar: universalidade, continuidade, acessibilidade, qualidade do serviço e proteção dos utilizadores.

### 2.2.1. Acionistas

Detentora de um capital social de €16.712.225,00 totalmente realizado, a SIMRIA, S.A. é participada pela AdP - Águas de Portugal, SGPS, SA, e pelos municípios de Águeda, Albergaria-a-Velha, Aveiro, Cantanhede, Espinho, Estarreja, Ílhavo, Mira, Murtosa, Oliveira do Bairro, Ovar, Santa Maria da Feira e Vagos, de acordo com a seguinte estrutura acionista.

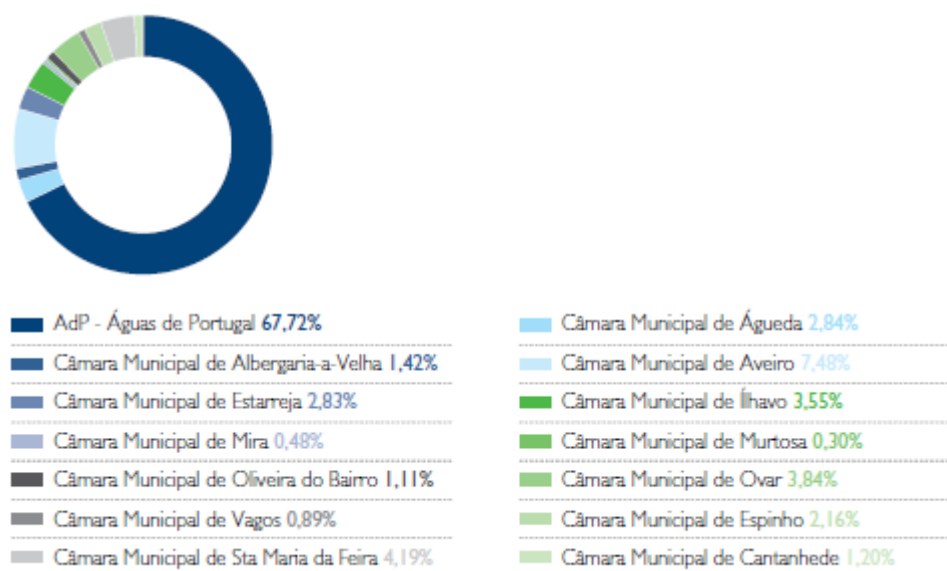


Figura 2 - Estrutura acionista da empresa (Fonte: Relatório e Contas 2013).

### 2.2.2. Cadeia de Valor

O ciclo que caracteriza a atividade da SIMRIA tem início na identificação das necessidades de saneamento em "alta" da região que, depois de suportadas num contrato de concessão e no recurso à comparticipação financeira comunitária, desencadeiam uma sucessão de etapas através das quais a SIMRIA dá cumprimento à missão a que se propôs.

Na Operação do Sistema Multimunicipal, a SIMRIA recorre a todo o know-how e experiência acumulada no sentido, não só, de criar valor intrínseco no desenvolvimento da sua atividade, mas sobretudo de obter um desempenho que seja devidamente valorizado pelas diferentes interfaces com que se relaciona.

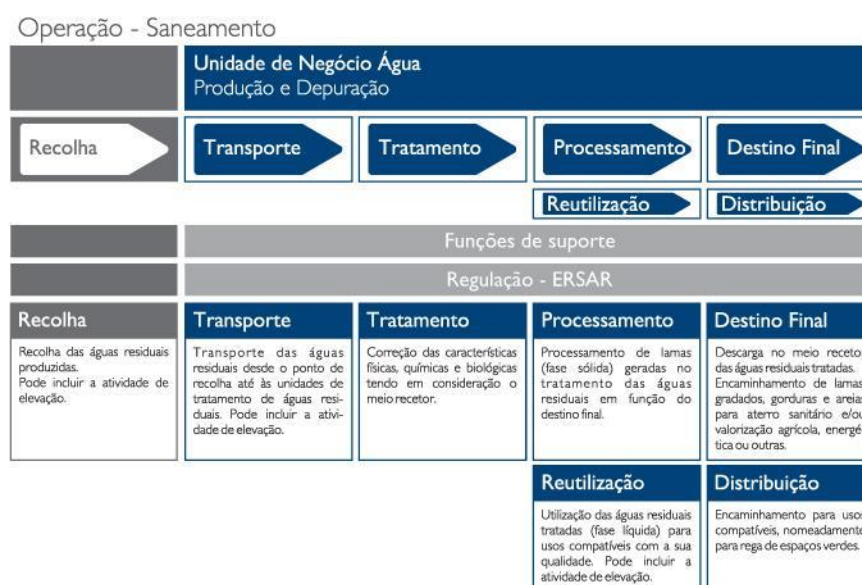


Figura 3 - A cadeia de valor associada a atividade chave da empresa (Fonte: Relatório e Contas 2013).

### 2.2.3. Síntese de Indicadores

No quadro seguinte constam os principais indicadores da atividade da SIMRIA no triénio 2011/ 2013.

	Unidade	2011	2012	2013
<b>Atividade</b>				
Volume de efluente recolhido	10³ m³	37.216	34.042	40.462
Volume de efluente tratado	10³ m³	26.194	23.649	29.806
Volume de efluente rejeitado (caudal médio diário doméstico e industrial)	m³/dia	101.961	93.266	110.856
População abrangida	Hab	468.686	466.662	469.526
População servida	Hab	468.686	466.662	469.526
Municípios abrangidos	N.º	13	13	13
Municípios servidos	N.º	13	13	13
<b>Infraestruturas</b>				
Extensão de rede em funcionamento	km	315	317	319
Estações elevatórias e pontos de entrada disponibilizados	Unid	208	211	212
Estações elevatórias em funcionamento	Unid	76	77	78
ETAR em funcionamento	Unid	5	7	8
Emissários submarinos em funcionamento	Unid	2	2	2
<b>Económico-financeiros</b>				
Investimento (não considera investimento financeiro)	Milhar €	6.817	4.780	2.216
Volume de negócios	Milhar €	16.234	17.204	17.709
Gastos operacionais	Milhar €	13.830	13.476	14.377
Gastos com pessoal	Milhar €	1.955	1.778	2.448
Gastos financeiros	Milhar €	4.277	5.278	5.203
Resultados operacionais	Milhar €	5.103	6.527	6.132
Resultado líquido do exercício	Milhar €	1.207	1.395	915
Imobilizado líquido	Milhar €	207.494	207.166	205.054
EBITDA (resultados operacionais + amortizações + provisões)	Milhar €	10.878	12.273	9.089
Cash-flow (resultado líquido + amortizações + provisões - sub. Investimento)	Milhar €	4.444	4.606	3.872
Ativo líquido	Milhar €	240.481	239.090	231.619
Endividamento	%	45	45	45
<b>Produtividade</b>				
Gastos com pessoal/ caudal total	€/ m³	0,0525	0,0522	0,0605
Gastos financeiros/ caudal total	€/ m³	0,1149	0,1550	0,1286
Gastos operacionais/ caudal total	€/ m³	0,3716	0,3959	0,3553
<b>Qualidade do Serviço</b>				
Cumprimento das licenças de descarga	%	100	99,7	100,0
Índice de satisfação do cliente (escala de 1 a 4)	N.º	2,6	2,8	2,8
Reclamações	N.º	3	4	4
<b>Desempenho Ambiental</b>				
Resíduos encaminhados para valorização/reutilização	%	92,17	92,16	91,74
Descargas de emergência com duração superior a 2h	N.º	13	12	5
Consumo de recursos energéticos por m³ de caudal recolhido	kWh/m³	0,564	0,553	0,549
Produção de lamas por milhões de m³ de água tratada	ton/milhões m³	544,92	634,15	448,00
<b>Desempenho Social</b>				
N.º de Colaboradores	N.º	82	81	70
Preocupações sociais	N.º	0	1	0
Educação Ambiental - Visitas às ETAR	N.º visitantes	1.120	919	1.154
Taxa de frequência (n.º acidentes trabalho/ n.º horas-homem trabalhadas) x 10⁶	N.º	87,21	54,72	43,50
Taxa de gravidade (n.º dias úteis perdidos/ n.º horas-homem trabalhadas) x 10⁶	N.º	905,62	583,14	159,49

Figura 4 - Principais indicadores da atividade e de gestão da SIMRIA no triénio 2011/2013 (Fonte: Relatório e Contas 2013).

#### 2.2.4. O Sistema Multimunicipal

O Sistema Multimunicipal de Saneamento da Ria de Aveiro apresenta uma solução para a coleta, tratamento e destino final dos efluentes da Ria de Aveiro, cujo equilíbrio tem vindo a ser ameaçado pelos problemas de poluição devido às descargas de águas residuais domésticas e industriais na laguna.



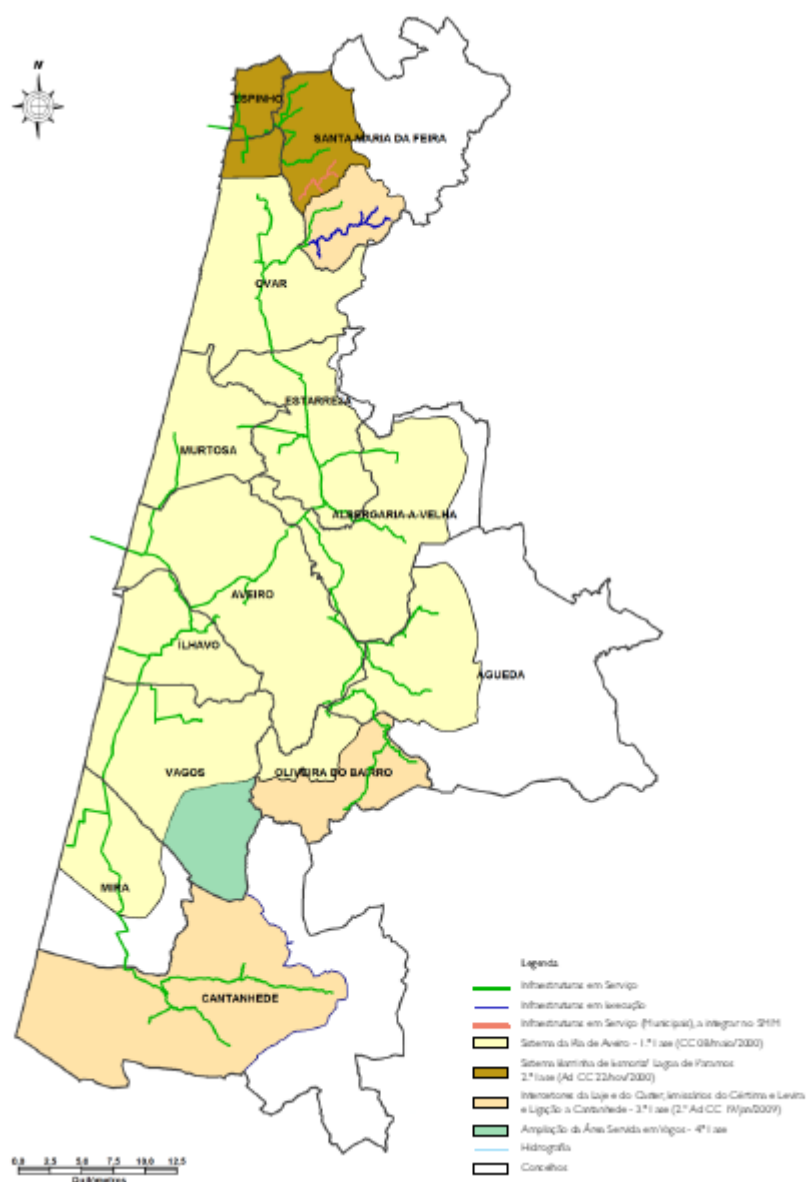


Figura 5 – Sistema Multimunicipal de Saneamento da Ria de Aveiro (Fonte: Relatório e Contas 2013).

### 1ª Fase

Representando uma solução integrada de recolha, tratamento e rejeição dos efluentes, o Sistema Multimunicipal foi concebido inicialmente para servir 10 municípios: Águeda, Albergaria-a-Velha, Aveiro, Estarreja, Ílhavo, Mira, Murtosa, Oliveira do Bairro, Ovar e Vagos, abrangendo um total de 800 mil habitantes-equivalentes, no ano de horizonte do projeto (2018).

### *2ª Fase*

Em 2000, o Sistema Multimunicipal foi alargado aos municípios de Espinho e de Santa Maria da Feira (parcialmente) e ampliado no Município de Ovar, de forma a integrar o projeto de despoluição da Barrinha de Esmoriz/ Lagoa de Paramos, abrangendo um total de 208.600 habitantes-equivalentes.

O subsistema da Barrinha de Esmoriz/ Lagoa de Paramos envolve a ligação à ETAR de Espinho dos subsistemas de Espinho (Espinho), Ovar (Esmoriz e Cortegaça) e de Santa Maria da Feira (bacia que drena para a Barrinha de Esmoriz/ Lagoa de Paramos), sendo que os efluentes tratados na ETAR de Espinho são posteriormente encaminhados para o Exutor Submarino de Espinho através do qual são rejeitados no mar. Para o efeito, a ETAR de Espinho foi intervencionada, remodelada e ampliada para um caudal de 30.890 m<sup>3</sup>/ dia no horizonte do projeto (2030).

Inicialmente dimensionado para uma população total de 800 mil habitantes-equivalentes, o sistema multimunicipal passou a servir um universo populacional que ultrapassa 1.000.000 de habitantes-equivalentes, num horizonte de 50 anos.

### *3ª Fase*

A 3ª fase, já concluída no âmbito do contrato de concessão em vigor, correspondeu a todos os investimentos de expansão da rede a novas áreas territoriais e/ ou municípios.

Refira-se nomeadamente o prolongamento do Intercetor Vouga para recolher os efluentes gerados na totalidade do concelho de Oliveira do Bairro; o prolongamento do Intercetor Sul de forma a abranger parte do concelho de Cantanhede (o tratamento é efetuado na ETAR Sul) e o prolongamento do Intercetor Norte ao longo das bacias das ribeiras do Caster e da Laje no concelho de Santa Maria da Feira (o tratamento é efetuado na ETAR Norte). Abrangendo um total de 120.900 habitantes-equivalentes.

Tabela 1 – Tabela Resumo com as características de cada Fase do Sistema Multimunicipal (Fonte: Relatório e Contas 2013).

	Componente de Recolha de Águas Residuais			Componente de Tratamento de Águas Residuais		Componente de Rejeição	
	Extensão dos Intercetores e Emissários (km)	Nº Estações Elevatórias	Nº Pontos de Entrada	População abrangida (hab. eq.)	Caudal Médio Diário (m³/dia)	Extensão dos Intercetores (km)	Nº Estações Elevatórias
1ª Fase	176	54	68	ETAR Norte - 272.000 ETAR Sul - 159.700 ETAR S.Jacinto - 9.377	ETAR Norte - 48.705 ETAR Sul - 39.278 ETAR S.Jacinto - 1.065	Intercetor Geral - 25 Exutor Submarino - 3	Intercetor Geral - 3 Exutor Submarino - -
2ª Fase	176+31,2 = 207,2	54+6 = 60	68+40 = 108	ETAR Espinho - 194.232 ETAR Remolha - 6.500	ETAR Espinho - 30.890 ETAR Remolha - 1.040	Exutor Submarino - 2	-
3ª Fase	207,2+80,5 = 287,7	60+15 = 74	108+76 = 184	-	-	-	-

### *Ampliação em Vagos*

Pelo Despacho n.º 9976/2010 da Ministra do Ambiente e do Ordenamento do Território foi determinado que o Sistema Multimunicipal de Saneamento da Ria de Aveiro passasse a abranger todo o território do município de Vagos e que a SIMRIA, tomasse, desde logo, todas as iniciativas adequadas, nomeadamente no que respeita à realização de projetos e obras, incluindo estudos e candidaturas a fundos comunitários, relacionadas com a concretização deste objetivo. Nesse seguimento, estão a ser exploradas pela SIMRIA uma Estação Elevatória (EE de Santa Catarina) e quatro ETAR e emissário complementar de ligação à rede municipal, de acordo com o quadro que se apresenta de seguida.

Tabela 2 - Dados relativos ao horizonte de projeto de cada uma das instalações em exploração (Fonte: Relatório e Contas 2013).

	População abrangida (hab. eq)	Caudal Médio Diário (m3/dia)
ETAR do Salgueiro	250	30
ETAR de Santa Catarina	1000	120
ETAR de Ouca	800	96
ETAR de Ponte de Vagos	4.834	968

### 2.2.5. Estrutura Organizacional

A estrutura atual da SIMRIA compreende duas direções sob a tutela da Administração, a Direção de Operação e Infraestruturas e a Direção Administrativa e Financeira. A reportar à administração existem dois órgãos Staff: o Sistema de Responsabilidade Empresarial e o Departamento de Qualidade do Processo, para além do Secretariado, da Assessoria Jurídica e da Comunicação e Imagem, conforme se apresenta no seguinte organigrama:

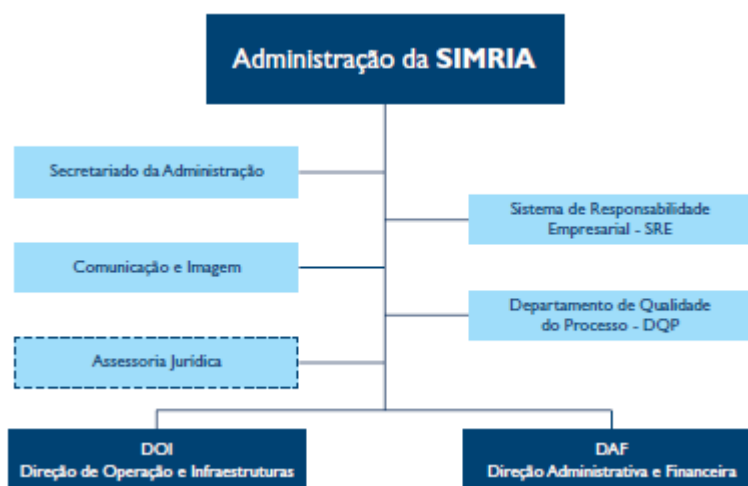


Figura 6 – Estrutura organizacional da SIMRIA (Fonte: Relatório e Contas 2013).

### 2.2.6. Direção de Operação e Infraestruturas (DOI)

É responsável por toda a atividade associada a recolha, tratamento e rejeição de efluentes, bem como a manutenção dos equipamentos. Divide-se em três áreas funcionais: Centro Operacional I (CO I), responsável pela Operação e Manutenção da ETAR Norte; Centro Operacional II (CO II), responsável pela Operação e Manutenção das ETAR Sul, S. Jacinto, Salgueiro, Santa Catarina, Ouca e ETAR Ponte de Vagos e Operação e Manutenção de Condutas, Estações Elevatórias e Pontos de Entrada (OMCEEPE). É igualmente responsável por toda a atividade associada a conceção e planeamento, através da área funcional Estudos e Planeamento, e por toda a atividade associada a construção e

manutenção das infraestruturas, através da área funcional Obras. Nesta direção está ainda inserida a área funcional Administração de Sistemas, responsável pela informática, telecomunicações, SIG (sistemas de informação geográfica) e automação. A reportar diretamente a Direção, existe ainda o órgão de staff Secretariado.

### 2.2.7. Direção Administrativa e Financeira (DAF)

É responsável pela gestão administrativa, económica, financeira e de recursos humanos e onde se encontram concentrados os diversos serviços: Contabilidade, Compras, Tesouraria, Recursos Humanos, Fundo de Coesão e Gestão de Frota.

### 2.2.8. Funcionamento da Empresa

Na sua generalidade, o funcionamento da empresa assenta em torno da execução da sua estratégia e no cumprimento de um conjunto de atividades que se sucedem respeitando as etapas do ciclo PDCA (Plan, Do, Check and Act), conforme figura a seguir apresentada.

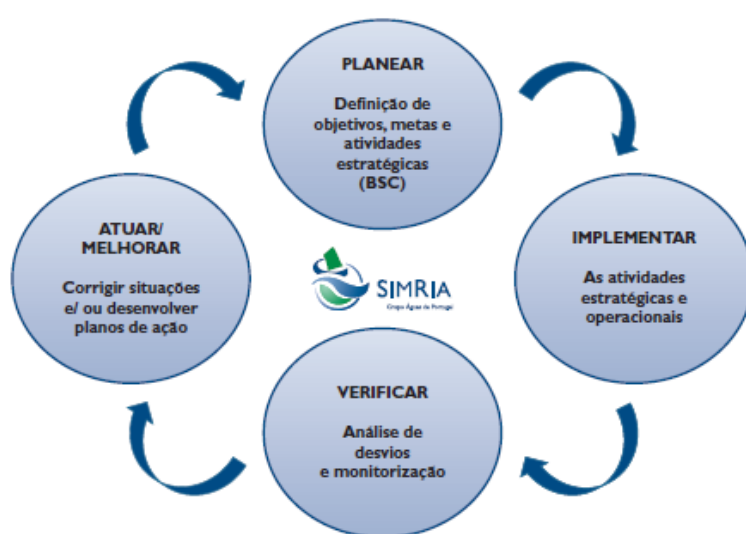


Figura 7 – Ciclo PDCA (Fonte: Relatório e Contas 2013).

Desta forma, pretende-se garantir que a implementação dessas atividades é desenvolvida de acordo com o planeado, sendo que, qualquer desvio verificado deve ser devidamente tratado a fim de ser corrigido e/ou permitir o desenvolvimento de melhorias que visem a sua prevenção em situações futuras.

Em termos de comunicação interna, a Empresa privilegia uma comunicação descendente e ascendente que garante que a informação é compreendida pelos colaboradores. Esta comunicação pode ser realizada via mail interno, informações internas e reuniões. A suportar o desenvolvimento destas atividades existe uma estrutura documental devidamente registada, controlada e arquivada. Com o objetivo de melhorar a gestão dos fluxos documentais e de diminuir o recurso ao papel, a empresa implementou o sistema informático de Gestão Documental SIMDoc, estando a funcionar em pleno desde 2007.

#### **2.2.9. Relações com Stakeholders**

A SIMRIA está consciente das suas responsabilidades enquanto Empresa prestadora de um serviço de interesse público que interage com vários parceiros, os quais, direta ou indiretamente, constituem partes interessadas no desempenho da sua atividade.



Figura 8 – Stakeholders da SIMRIA (Fonte: Relatório e Contas 2013).

Para orientar a SIMRIA no cumprimento da sua missão existem um conjunto de diretrizes que provêm do Ministério do Ambiente, Ordenamento do Território e Energia, entidade concedente da gestão do Sistema Multimunicipal.

A AdP - Águas de Portugal, SGPS, SA, enquanto acionista maioritário detentor de um relevante know-how e experiência acumulada no setor, representa um pilar fundamental na gestão estratégica da empresa.

Com um duplo posicionamento, alguns municípios apresentam-se simultaneamente como acionistas e clientes/utilizadores diretos do Sistema Multimunicipal, com quem a SIMRIA estabelece diversas parcerias no sentido de melhorar as taxas de atendimento de saneamento que caracterizam a região. Pelo facto de ter integrado 9 municípios abrangidos pelo Sistema Multimunicipal, a AdRA passou a ser o principal cliente da SIMRIA, para além da Unidade Industrial da Portucel, que apenas utiliza a componente de rejeição do Sistema Multimunicipal.

No que diz respeito às populações e no âmbito da comunicação da empresa, importa referir a ênfase desde sempre dada pela SIMRIA no desenvolvimento de diversas ações junto das populações da região. A este nível, refira-se o trabalho de sensibilização,

realizado prioritariamente junto de um público infanto-juvenil, na promoção das questões ambientais, em particular dos recursos hídricos, bem como o desenvolvimento de ações variadas no âmbito da Educação Cívica da população, em matéria ambiental.

As relações com as instituições comunitárias sempre se pautaram pelo bom relacionamento entre as partes, traduzido nas diversas candidaturas que suportam a construção e ampliação do Sistema Multimunicipal.

No que se refere ao relacionamento com os fornecedores e com as diversas entidades do setor, de onde se destaca a Entidade Reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos (ERSAR) e a Administração para os Recursos Hídricos (ARH), a SIMRIA desde sempre procurou estabelecer relações estáveis e de confiança.



## Capítulo 3.

### ETAR NORTE

Neste capítulo será descrito o local, ETAR Norte, onde decorreram os seis meses de Estágio. Ao longo do curso em Engenharia Civil, quer Licenciatura quer Mestrado, não foi possível explorar assuntos relacionados com Estações de Tratamento de Águas Residuais, o seu dimensionamento, a sua constituição, a forma de funcionamento. Em seguida, e no sentido de adquirir conhecimentos numa área até então desconhecida, será descrita a ETAR Norte, que sendo a maior das ETAR da SIMRIA, é um bom exemplo de uma ETAR. Descrevem-se as instalações e órgãos, bem como o ciclo da água residual, os elementos de controlo para aquisição de dados e as variáveis a medir e controlar.

#### 3.1. ETAR Norte

A ETAR Norte está localizada na freguesia de Cacia, concelho de Aveiro e encontra-se em funcionamento desde Junho 2003. Foi projetada para satisfazer as necessidades de tratamento de efluentes provenientes dos concelhos de Águeda, Aveiro (parte), Albergaria-a-Velha, Estarreja, Murtosa, Oliveira do Bairro e Ovar, correspondendo a um investimento de cerca de 12,4 milhões de euros, participado em 85% pelo Fundo de Coesão.

A ETAR Norte está dimensionada para servir no ano horizonte de projeto (2018) uma população de 272.000 habitantes equivalentes e tratará um caudal médio diário de cerca de  $48.705 \text{ m}^3$ . Em 2013 a população servida foi de 230.020 habitantes equivalentes e o caudal médio diário foi de  $39.835 \text{ m}^3/\text{dia}$ .

Ao nível da fase líquida, esta ETAR realiza tratamento secundário dos efluentes urbanos (domésticos e industriais), através das seguintes etapas: pré-tratamento, decantação primária, tratamento biológico e decantação secundária. Do tratamento da fase sólida,

resulta a produção de biogás, aproveitável para a produção de energia, e de lamas digeridas e desidratadas, valorizáveis na agricultura.



Figura 9 – Localização da ETAR Norte (Fonte: Documentação da ETAR).



Figura 10 – Estação de Tratamento de Águas Residuais Norte (Fonte: Documentação da ETAR).

Legenda:

- |                               |                                                |
|-------------------------------|------------------------------------------------|
| 1. Edifício de Pré-Tratamento | 7. Edifício de Tratamento de Lamas e Cogeração |
| 2. Decantação Primária        | 8. Digestão Secundária e Gasómetro             |
| 3. Tratamento Biológico       | 9. Silo de Lamas                               |
| 4. Decantação Secundária      | 10. Posto de Transformação                     |
| 5. Espessamento das Lamas     | 11. Edifício de Exploração                     |
| 6. Digestão Primária          |                                                |

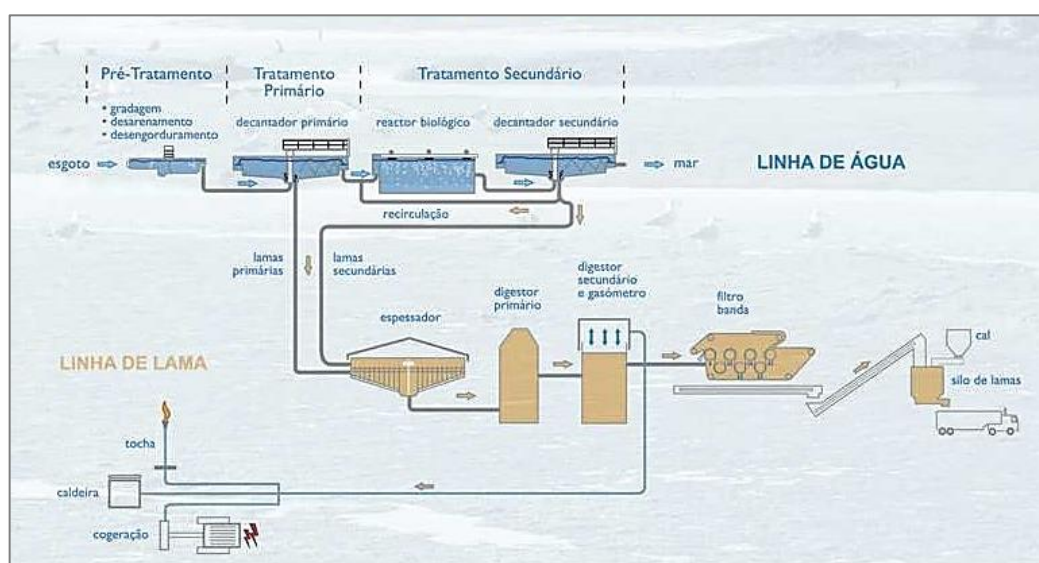


Figura 11 - Diagrama Funcional/Linha de Tratamento (Fonte: Documentação da ETAR).

## 3.2. Linha de tratamento

### 3.2.1. Linha de tratamento da fase líquida (linha de água):

Pré-tratamento – início do tratamento das águas residuais que afluem em pressão à ETAR, abrangendo gradagem, desarenamento e desgorduramento. Esta fase consiste na eliminação/redução de elementos grosseiros que possam interferir com as operações seguintes ou que possam aumentar os custos de operação dos processos seguintes. Entre estes elementos destacam-se os sólidos grosseiros, panos, areias, bem como grandes picos de cargas hidráulicas e orgânicas (Vesilind, 2003).

Tratamento Primário – remoção parcial dos sólidos suspensos e de matéria orgânica através de processos físicos, como a sedimentação (decantação primária). O tratamento primário atua como um precursor para o tratamento secundário, “produzindo” um efluente líquido mais clarificado e adequado ao tratamento biológico e separando os sólidos como a lama, denominada de lama primária, de modo a que esta seja convenientemente tratada antes de ser enviada a destino final (Metcalf & Eddy, 2003).

Tratamento Secundário – tem por objetivo remover os compostos orgânicos solúveis e coloidais e sólidos em suspensão, que permanecem no efluente após o tratamento primário. Em muitos casos, este tipo de tratamento também é utilizado para a remoção de nutrientes, nomeadamente fósforo e azoto (Metcalf & Eddy, 2003). Na sua generalidade o tratamento secundário tem por base um tratamento biológico, através de microrganismos que decompõem a matéria orgânica, pois as águas residuais têm uma forte componente biodegradável. O tratamento de água na ETAR Norte é constituído pelas seguintes fases:

- Obra de entrada e descarregador de segurança da água bruta
- Gradagem de finos
- Desarenador-desengordurador em canal arejado
- Medição em canal Parshall do caudal de água pré-tratada
- Decantação primária
- Reator biológico
- Decantação secundária
- Medição em canal Parshall do caudal de água tratada
- Reservatório de água tratada
- Descarga do efluente na estação elevatória EEIG1

### **3.2.2. Linha de tratamento da fase sólida (linha de lamas):**

Através do tratamento da fase líquida, mais concretamente no decantador primário e decantador secundário, são captados os subprodutos gerados, denominados de lamas. A fase de tratamento de lamas tem por objetivo tornar o seu manuseamento mais fácil e

mais seguro, assim como reduzir os custos do seu transporte a destino final (Pereira, 2008). O tratamento das lamas na ETAR Norte é constituído pelas seguintes fases:

- Recirculação das lamas secundárias para o reator biológico
- Extração de lamas em excesso dos decantadores secundários para a câmara de mistura
- Extração de lamas dos decantadores primários para a câmara de mistura
- Mistura das lamas primárias e biológicas em excesso
- Espessamento por gravidade das lamas misturadas
- Bombagem das lamas espessadas para a DA
- Digestão primária anaeróbia
- Aquecimento e agitação das lamas nos digestores primários
- Digestão secundária
- Recuperação de energia mediante motogeradores a gás
- Desidratação mecânica mediante filtros banda
- Extração de lamas desidratadas para o silo de armazenamento

### 3.3. Descrição das Instalações e Órgãos

#### 3.3.1. Gradagem de sólidos finos

Para o correto tratamento das águas residuais torna-se necessário proceder à sua gradagem. Para o efeito existem 2 grelhas mecânicas providas de dispositivos de autolimpeza e com malha de 3 mm e uma grelha manual de emergência com 1,5 m de largura, sendo a altura de água de 1 m para o caudal máximo. As grelhas manuais têm um afastamento de 10 mm entre barras da grade. As grelhas do pré-tratamento encontram-se instaladas em dois canais paralelos, com 1 m de largura, apresentando cada uma delas uma capacidade de 2484 m<sup>3</sup>/h. Duas comportas de 1 m de largura permitem o isolamento destas linhas, sendo o seu acionamento manual e a altura de água de 0,82 m.

Os resíduos extraídos pelos filtros caem sobre um parafuso transportador transversal comum às duas grades, situado a aproximadamente 50 cm acima da plataforma de betão.

Para permitir e facilitar a limpeza de resíduos que inevitavelmente se desprendem no decurso desta operação, existe uma boca de rega com mangueira e um módulo de limpeza junto ao parafuso. O parafuso transportador descarrega os gradados sobre um contentor com 800 litros de capacidade. O funcionamento do parafuso é automático, coordenado com o funcionamento das grades, e permanecendo em funcionamento mais de 30 segundos do que estas. Seguidamente situa-se uma caixa de interligação das linhas de tratamento, para entrada nos desarenadores-desengorduradores.

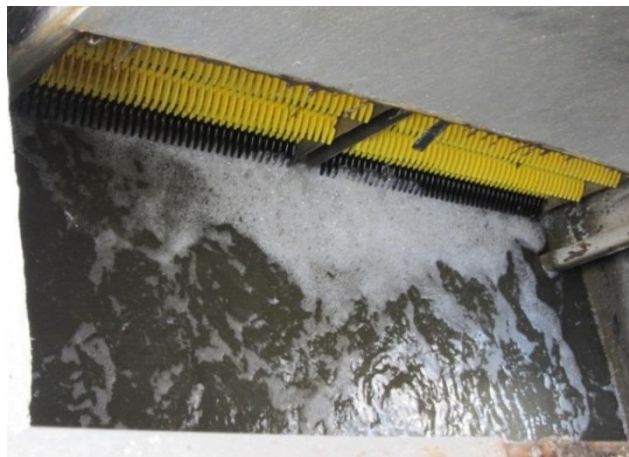


Figura 12 – Gradagem dos sólidos finos.

### **3.3.2. Desarenador-desengordurador**

#### **3.3.2.1. Desarenador-desengordurador com arejamento**

Existem duas unidades de funcionamento combinado tipo “canal” com pré-arejamento, separação de óleos e extração de areias. Cada uma das unidades é composta por dois canais paralelos de 31 m de comprimentos, um deles de 3 m de largura que funciona como desarenador e outro lateral com 1,5 m de largura, separado do canal central por uma parede de 0,20 m de espessura, que funciona como desengordurador. A alimentação da água a cada uma das unidades situa-se na sua parte frontal, sendo isolada mediante a respetiva comporta de canal. Dadas as características especiais da parede do canal desengordurador, a superfície deste fica livre da agitação que se produz no canal

desarenador em consequência do arejamento, estabelecendo-se uma zona de tranquilização na qual os óleos e gorduras não emulsionados depois de passarem do canal central para o lateral pela zona inferior da parede de separação são posteriormente recolhidos. A quantidade de ar necessária para se conseguir a eliminação da emulsão dos óleos e gorduras depende fundamentalmente da relação das superfícies efetivas de agitação/tranquilização. O sistema conjunto desarenador-desengordurador arejado apresenta vantagens quanto à possibilidade de se efetuar a extração e remoção deste tipo de resíduos apenas num ponto, o que produz um menor impacto estético e facilita as operações de manutenção.



Figura 13 – Desarenador-desengordurador.

#### 3.3.2.2. Extração e separação de areias

Sobre a unidade de desarenamento-desengorduramento dispõe-se uma ponte móvel, suporte da bombagem de areias e do sistema de raspadores de superfície, dotado de movimento longitudinal mediante um motoredutor, e dirigido no seu sentido de deslocamento por uns inversores de marcha. Um mecanismo de controlo dirige a posição dos raspadores superficiais de forma a que permaneçam levantadas quando a ponte avança em sentido contrário ao do fluxo de água, e se mantenham descidas quando a direção do

seu deslocamento seja o mesmo que o do fluxo de água. As bombas móveis, instaladas sobre a ponte, vão aspirando por sua vez as areias depositadas na canaleta central do desarenador. Seguidamente a mistura areia/água passa por um classificador-lavador, que consiste numa rampa percorrida por um raspador acionado por um motoredutor que imprime ao raspador um movimento de vaivém e avanço, obrigando as areias a subir até um extremo, de onde tombam para um contentor com 800 l de capacidade.



Figura 14 – Classificador de areias.

#### 3.3.2.3. Extração e separação de óleos e escumas

Os óleos e gorduras, uma vez na zona lateral de tranquilização do desarenador-desengordurador, isto é, no canal desengordurador, são arrastados pelos raspadores superficiais da ponte para uma zona lateral que descarrega para um concentrador. A separação superficial dos óleos e gorduras emulsionadas consegue-se mediante a injeção de ar a baixa pressão, proveniente de três grupos compressores de êmbolos rotativos de 633 Nm<sup>3</sup>/h de caudal a 4,25 m.c.a de pressão. Este ar introduz-se através de quatro coletores de aço galvanizado (dois por desarenador) dotados de difusores não colmatáveis colocados num murete, fixados no muro de separação entre os desarenadores. A mistura de água e óleo passa para um separador de raspadores. No final do tanque a água passa por debaixo de um defletor para uma segunda câmara provida de um descarregador para a evacuação do sobrenadante, que é reconduzido à cabeça da estação. Os óleos e sobrenadantes são



retidos automaticamente por meio do troço final inclinado onde se produz a sua concentração, sendo finalmente vertidos para um contentor de 800 l de capacidade, para posterior remoção. Para maior facilidade de manutenção, centralizou-se neste separador, a remoção de óleos e sobrenadantes dos decantadores primários, dado que a implantação dos órgãos da ETAR assim o permite.



Figura 15 – Recolha de gorduras.

### 3.3.3. Medição do caudal de água pré-tratada

A medição de caudal é feita utilizando-se um canal tipo Parshall, com uma gola de 121,6 cm e capacidade para medição de caudais de 36,80 e 1925 l/s. O canal situa-se na continuação dos desarenadores-desengorduradores e a jusante destes. A montante do canal de medição situa-se um descarregador de 5 m de comprimento, que limita ao caudal de ponta (máximo em tempo seco), o caudal máximo afluyente ao tratamento primário. Existe ainda uma comporta manual que permite realizar o by-pass geral da água pré-tratada.



Figura 16 - Canal Parshall.

### 3.3.4. Decantação primária

#### 3.3.4.1. Repartição para os decantadores

A água pré-tratada proveniente do canal de medição entra na câmara de repartição para os decantadores primários, que consta de dois descarregadores de 5 m de comprimento isolados pelas suas correspondentes comportas, onde será feita uma perfeita repartição dos caudais.



Figura 17 – Câmara de repartição da água pré-tratada.

#### 3.3.4.2. Decantadores primários

Com este tratamento prevê-se reduzir as cargas contaminantes de sólidos em suspensão (SST) e de  $\text{CBO}_5$  em 60 e 30%, respetivamente, com base em meios mecânicos simples, e portanto com um baixo consumo energético.

Existem dois decantadores circulares de 34 m de diâmetro, com uma profundidade de 3 m que proporciona um volume total unitário de  $2724 \text{ m}^3$  e um tempo de retenção de 1,49 horas para o caudal máximo afluente.

Para que se consiga a decantação por gravidade das partículas em suspensão, a água bruta é introduzida pela parte inferior do decantador, saindo por umas aberturas existentes na coluna central, projetadas de forma tal que a baixa velocidade de saída não produza alterações notáveis a superfície da lâmina líquida. Para que a água siga o percurso descendente, que facilita a decantação, a coluna central será rodeada por um cilindro metálico.

Uma vez introduzida a água no decantador devem ser cumpridos dois condicionantes básicos para o seu correto funcionamento: o tempo de retenção ou permanência suficiente e a carga superficial inferior à velocidade de queda das partículas.

À medida que a água atravessa o decantador as partículas sólidas sedimentáveis separam-se do líquido, depositando-se no fundo do tanque. A água decantada é recolhida num canal periférico de  $0,50 \times 0,93 \text{ m}$  com pendente para um ponto de onde passa para a caixa de recolha da água decantada. Por outro lado, as partículas sedimentadas (as lamas) depositadas no fundo do tanque são varridas continuamente pelos raspadores de fundo presos a uma ponte giratória, por forma a que as lamas se desloquem para um poço ou fosso de concentração, do qual são extraídas através de tubagem, passando em seguida a um poço de bombagem de lamas primárias e de escumas. Outros materiais que originam graves problemas em todo o processo de tratamento são as escumas, sobrenadantes e óleos,

que, devido à sua baixa densidade nuns casos e às suas pequenas dimensões noutros, são facilmente perceptíveis em qualquer instalação. O decantador projetado tem incorporado um sistema de eliminação destes materiais, gozando, tal como todo o restante equipamento, da ampla experiência com excelentes resultados de utilização, face à simplicidade do seu funcionamento que, essencialmente é integrado por um sistema de varrimento superficial que arrasta estes materiais para uma caixa de escumas, fixada na periferia do decantador. Uma válvula de fundo, situada na dita caixa é acionada automaticamente pela ponte raspadora, permite a passagem de um jato de água com o fim de produzir o efeito de arrastamento dos sobrenadantes extraídos com o mecanismo oscilante de varrimento da superfície. A mistura da água com os sobrenadantes é conduzida por tubagem até ao poço onde estão instaladas as bombas submersíveis adequadas para este tipo de fluídos, acionadas por ondas de nível e equipadas com as suas correspondentes válvulas de seccionamento e retenção. O fluido bombeado é encaminhado para o separador de óleos e gorduras comum ao desarenador-desengordurador.



Figura 18 – Decantadores primários.

### 3.3.5. Tratamento biológico

#### 3.3.5.1. Repartição entre reatores e “by-pass”

A água decantada procedente da caixa de recolha entra na câmara de repartição dos reatores biológicos. Esta é composta por três descarregadores de 3 m de comprimento isolados pelas respetivas comportas, onde será feita a repartição perfeita dos caudais.

Na mesma caixa existe uma comporta mural manual que permite o by-pass geral da água decantada. A alimentação de cada um dos reatores é feita através de um canal de 1 m de largura.

#### 3.3.5.2. Reator biológico

Para realizar o tratamento biológico e obter os rendimentos necessários de eliminação de  $\text{CBO}_5$  e SST, existem três bacias de arejamento com 72 m de comprimento por 18 m de largura e 3,7 m de altura útil, o que proporciona um volume total de 14.386  $\text{m}^3$  e uma carga mássica de 0,275 kg  $\text{DBO}_5/\text{d}/\text{kg ML}$ . Com estes valores pretende-se obter um rendimento de eliminação de  $\text{CBO}_5$  da ordem de 89,81%.

O conteúdo de cada reator sai por um descarregador de 18 m de comprimento, dotado de um deflector, para ser encaminhado através de uma tubagem à câmara de repartição para a entrada nos decantadores secundários.



Figura 19 – Reator biológico.

### 3.3.5.3. Turbinas de arejamento

O meio mais eficaz de transferir oxigénio consiste em introduzir ar atmosférico no meio, seja por insuflamento de ar na massa líquida utilizando ventiladores ou compressores, seja aumentando mecanicamente a relação ar-água por criação de uma forte turbulência superficial que favorece a dispersão da água na atmosfera, em forma de gotas finas. Qualquer que seja sistema de arejamento, este tem de cumprir dois objetivos: transferir o oxigénio necessário e homogeneizar o meio líquido para que o oxigénio transferido atinja todas as partículas de lodo.

A turbina consiste essencialmente numa roda de pás disposta horizontalmente, pouco imersa no líquido e acionada por motoredutor, com uma velocidade compreendida entre 40 e 120 rpm, aproximadamente. A turbina bombeia a água situada abaixo dela e projeta-a horizontalmente a alguns centímetros acima da superfície da água. Estas projeções, que caem de novo sob a forma de gotas finas, asseguram uma renovação da superfície de contacto ar-água, tendo como consequência a oxigenação do meio líquido.

A velocidade de rotação da turbina, o seu diâmetro e o seu grau de imersão determinam o rendimento energético de transferência, grandeza característica medida em condições normalizadas (água limpa potável que não contenha oxigénio dissolvido e à temperatura de 20°C). Com o objetivo de ajustar o oxigénio a adicionar às necessidades pontuais, previu-se a temporização das turbinas, a fim de ajustar o melhor possível o consumo energético. Além disso, a correta operação do processo biológico exige a manutenção de um nível mínimo de oxigénio dissolvido nos reatores. Por outro lado o rendimento da transferência do oxigénio das turbinas diminui à medida que aumenta a concentração de oxigénio dissolvido. Assim é fundamental poder controlar com a máxima aproximação o nível de oxigénio no tanque, para tal existem aparelhos de medição de

oxigénio dissolvido com a indicação *in situ* e transmissão de sinal ao autómato correspondente.

Para satisfazer as necessidades de oxigénio e as suas flutuações existem na ETAR Norte 12 turbinas (4 em cada tanque), das quais as 2 mais distantes da entrada em cada uma das linhas de tratamento são de velocidade dupla, com 1,78 m de diâmetro e 75 kW de potência teórica, com uma velocidade de rotação de 56 rpm, o que se traduz uma potência de agitação por turbina de  $62,56 \text{ W/m}^3$ , e uma taxa real de transferência de oxigénio de  $1,3 \text{ kg O}_2/\text{kWh}$ . Os motores dos arejadores serão de 75 kW de potência unitária, a 1450 rpm. Em cada linha foi prevista a instalação de duas turbinas de velocidade dupla 1450/1000 rpm, com uma potência de 75/55 kW, as quais serão mais afastadas do ponto de entrada da água.



Figura 20 – Turbina de arejamento.

#### 3.3.5.4. Lamas a recircular e lamas em excesso

As tubagens de 500 mm de diâmetro provenientes dos decantadores secundários desembocam num poço de onde se efetua a bombagem das lamas a recircular e do excesso de lamas. Para tal, instalaram-se cinco bombas submersíveis de  $762 \text{ m}^3/\text{h}$  de capacidade

unitária, com as suas correspondentes válvulas de seccionamento e retenção. Esta instalação permitirá, quando funcionarem as 4 bombas, obter uma recirculação de 150% do caudal médio, na qual é necessário que o tratamento biológico funcione nas condições de ponta. Neste caso, e dado o carácter eventual da sua ocorrência, dispõe-se de uma unidade de reserva.

Optou-se por este tipo de bombas dado os excelentes resultados que oferecem para este tipo de instalações, com caudais elevados e pequenas alturas de elevação, e ainda devido ao seu custo de instalação ser menor do que o dos parafusos de Arquimedes. Para a elevação das lamas em excesso para o seu tratamento posterior incluíram-se dois grupos moto-bomba a instalar no poço de recirculação de lamas, com um caudal unitário de 150 m<sup>3</sup>/h a 10 m.c.a. Toda a instalação de recirculação, ou seja, o poço de chegada das tubagens de lamas, a bombagem das lamas em excesso e a bombagem dos sobrenadantes, está centralizada num mesmo conjunto, estando o poço dotado de um diferencial de 20 kN.

### **3.3.6. Decantação secundária**

#### **3.3.6.1. Repartição do caudal de entrada nos decantadores**

O efluente procedente do tanque de arejamento entra na câmara de repartição a montante dos decantadores secundários. Esta é constituída por 3 descarregadores de 5 m de comprimento isolados pelas correspondentes comportas, onde se produzira a perfeita repartição de caudais. A câmara de repartição dispõe de um quarto descarregador, tapado, para um futuro decantador a instalar quando houver necessidade.



### 3.3.6.2. Decantadores secundários

Existem três decantadores circulares, de 36 m de diâmetro e de 3,60 m de altura útil, o que corresponde a um volume total unitário de 3664 m<sup>3</sup> e um tempo de retenção ao caudal máximo de 3 horas.

Para que se consiga a decantação por gravidade das partículas em suspensão, a água bruta é introduzida pela parte inferior do decantador, saindo por umas aberturas existentes na coluna central, projetadas de forma tal que a baixa velocidade de saída não produza alterações notáveis na superfície da lâmina líquida. Para que a água siga um percurso descendente, que facilita a decantação, a coluna central será rodeada por um cilindro metálico.

Uma vez introduzida a água no decantador devem ser cumpridos dois condicionantes básicos para o seu correto funcionamento: tempo de retenção ou permanência suficiente e carga superficial inferior à velocidade de queda das partículas. À medida que a água atravessa o decantador as partículas sólidas sedimentáveis separam-se do líquido, depositando-se no fundo do tanque.

Para se conseguir obter uma baixa carga por metro linear de descarregador considerou-se um canal interior ao muro do decantador, dotado de um descarregador duplo, que melhorará os resultados da decantação.

A água decantada é recolhida num canal periférico afastado 1,50 m do muro do decantador e com as dimensões de 0,50 m x 0,57 m. O canal tem pendente para um ponto onde passa para a caixa de recolha da água decantada. O decantador tem incorporado um sistema de eliminação de sobrenadantes, usufruindo, tal como todo o restante equipamento, de ampla experiência com excelentes resultados de utilização, face à simplicidade do seu funcionamento que, essencialmente é integrado por um sistema de

varrimento superficial que arrasta estes materiais para uma caixa de escumas, fixada na periferia do decantador.

Uma válvula de fundo, situada na caixa de recolha e acionada automaticamente pela ponte raspadora, permite a passagem de um jacto de água com o fim de produzir o efeito de arrastamento dos sobrenadantes extraídos com o mecanismo oscilante de varrimento da superfície.

A mistura da água com os sobrenadantes é conduzida por tubagem até ao poço onde estão instaladas as bombas submersíveis adequadas para este tipo de fluidos, acionadas por sondas de nível e equipadas com as suas correspondentes válvulas de seccionamento e retenção. O fluido bombeado é encaminhado para a câmara de drenagem, para ser novamente conduzido para a obra de entrada.

Existe um sistema de recolha de lamas por aspiração que consiste num conjunto de tubos verticais desde o fundo até um canal situado na parte inferior da ponte raspadora. Face à pressão hidrostática a lama depositada no fundo sobe pelo tubo e passa para o canal, onde existe um sifão incorporado na ponte, que a conduz a um anel concêntrico com o pilar central, de onde é evacuada por uma tubagem de 500 mm.



Figura 21 – Decantador secundário.



Figura 22 – Decantador Secundário vazio com o sistema de recolha de lamas por aspiração visível.

### 3.3.7. Medição do caudal de água pré-tratada

Após a medição de caudal que é feita utilizando-se um canal tipo Parshall, com uma gola de 121,6 cm e capacidade para medição de caudais de 36,80 e 1925 l/s, este é encaminhado para um reservatório de água tratada com as dimensões de 10 m de comprimento, 8 m de largura e 2,5 m de altura útil, onde é efetuada a ligação da conduta de aspiração do grupo para alimentação da rede de pressão da ETAR. A saída da água tratada é feita através de um descarregador de 8 m de comprimento, sendo encaminhada para a estação elevatória EEIG1 através de uma tubagem com 1400 mm de diâmetro.

### 3.3.8. Tratamento das lamas

As estações de tratamento de água residuais têm como objetivo transformar as matérias poluentes dissolvidas em matérias sedimentáveis e separar estas últimas, bem como as matérias sedimentáveis inicialmente existentes nas águas, conseguindo-se obter a estabilização da matéria orgânica. Estas matérias, normalmente designadas por lamas, podem ter dois destinos diferentes: parte é enviada para os tanques de arejamento, para que aí se mantenha uma elevada concentração de micro-organismos (recirculação) e outra parte deve ser removida do sistema (lamas em excesso).

O armazenamento destas lamas sem tratamento ocuparia uma enorme superfície e seria uma origem de maus cheiros. Assim, o tratamento das lamas tem por finalidade:

- reduzir o volume de armazenamento por meio de uma operação de desidratação.
- armazenar um produto estabilizado, quer dizer, pouco propenso a originar maus cheiros. Isto supõe que as substâncias orgânicas biodegradáveis das lamas tenham sido previamente destruídas biologicamente (pelo menos parcialmente) ou estabilizadas mediante um tratamento químico ou térmico.

Existem três métodos para estabilizar biologicamente as lamas:

- Estabilização com cal a um pH superior a 12.
- A DA, que dá lugar à libertação de metano.
- A digestão aeróbia, que consiste em arejar fortemente as lamas, sem fornecimento de qualquer novo substrato. As lamas ativadas hiperoxigenadas utilizam as suas próprias reservas como fonte de nutrientes e autodestroem-se por respiração endógena.

Quanto à desidratação das lamas, pode obter-se:

- Através de secagem natural em leitos de areia ao ar livre.
- Através de um processo artificial: filtros de vácuo, centrifugação, filtros prensa, filtros de bandas, etc.

Na ETAR Norte optou-se por um espessamento por gravidade das lamas mistas, uma estabilização anaeróbia em duas etapas e uma desidratação final por filtros de bandas.

### 3.3.9. Espessamento das lamas

As lamas produzidas na estação de tratamento são retiradas da linha de tratamento da água e submetidas a um processo de espessamento, com a finalidade de reduzir o seu volume e assim aumentar a sua concentração, pela diminuição do seu teor em água.

O espessamento das lamas tem as seguintes vantagens:

- Reduz a capacidade dos tanques de estabilização situados a jusante, e consequentemente dos seus equipamentos.
- Diminui a quantidade de calor necessária para aquecimento das lamas na DA, secagem térmica ou incineração.
- Reduz o consumo de produtos químicos necessários para o acondicionamento ou estabilização das lamas.
- Reduz a dimensão do equipamento de desidratação, melhorando o seu funcionamento bem como o da operação.

Neste tipo de tratamento a função de espessamento é assegurada pela compressão própria ou forçada das lamas, que de acordo com a sua natureza, (teor em sólidos, matérias voláteis, temperatura, etc.) se desenvolve com maior ou menor dificuldade.

As lamas primárias, heterogêneas e que não foram submetidas a tratamento biológico, libertam facilmente água da sua constituição, e espessam bem. Pelo contrário, as lamas em excesso, homogêneas e floculantes, são muito menos facilmente desidratáveis.

Dependendo das características das lamas produzidas, do tipo de tratamento, da concentração pretendida para as lamas espessadas e do seu destino final, optar-se-á por uma localização adequada do espessador na linha de tratamento de lamas e pelo tipo ou forma de espessamento. De uma maneira geral, distinguem-se dois tipos de espessamento: por gravidade e por flotação. Nos espessadores por gravidade a concentração de sólidos

obtêm-se de forma natural, em função das características de sedimentação dos mesmos, enquanto nos espessadores por flotação a redução de volume das lamas obtêm-se de forma artificial como consequência da introdução de um gás na massa líquida, geralmente ar, que provoca o arrastamento das lamas até à superfície, vencendo assim a sua tendência para decantar.

Na ETAR Norte optou-se por efetuar uma mistura das lamas primárias e biológicas em excesso, seguindo-se o espessamento por gravidade das lamas mistas.



Figura 23 – Espessador de Lamas.

#### **3.3.9.1. Câmara de mistura das lamas primárias e biológicas em excesso**

As lamas primárias e biológicas em excesso são misturadas numa câmara dividida em dois compartimentos com as dimensões de 13m x 6,5 m x 3,10 m de profundidade, com um volume total de 262 m<sup>3</sup>, proporcionando um tempo de retenção de 62,88 minutos ao caudal máximo. Dois agitadores de 10 CV de potência unitária homogeneizam as lamas, em seguida estas seguem para os espessadores gravíticos, situados junto à câmara de mistura.

### **3.3.9.2. Espessadores de lamas mistas**

Na ETAR Norte o espessamento das lamas mistas é feito por dois decantadores por gravidade, de 20 de diâmetro, com uma altura útil de 4 m, o que proporciona um volume útil de 1518 m<sup>3</sup> e um tempo de retenção de sólidos mínimo de 2,58 dias. A descarga do espessador das lamas diluídas faz-se na sua parte central, sendo repartida igualmente e orientada por um cilindro metálico central suspenso na ponte. O varrimento das lamas é feito mediante 2 braços radiais com concentradores de fundo, construídos e, chapa de aço e terminados por neoprene. O sistema de varrimento é acionado por uma cabeça de comando central com motoredutor suportado por uma ponte diametral. As lamas espessadas são extraídas do fundo, enquanto o caudal saído é recolhido na parte superior para ser reintroduzido à cabeça da estação. Os espessadores de lamas eram inicialmente cobertos por uma cúpula de poliéster reforçado a fibra de vidro, dado que estava prevista a sua desodorização, contudo verificou-se que a deterioração do betão era muito elevada devido à acumulação de gases ácidos. Assim optou-se por retirar as cúpulas e os espessadores estão a céu aberto.

### **3.3.9.3. Bombagem para a digestão das lamas mistas espessadas**

As lamas espessadas são extraídas de cada um dos espessadores gravíticos por meio de tubagens ligadas à aspiração dos grupos motobomba que as encaminham para o processo de digestão. A utilização da aspiração direta diminui os problemas de entupimento destas canalizações. A instalação inclui 3 bombas de parafuso helicoidal de 10-30 m<sup>3</sup>/h a 20 m.c.a.

### 3.3.10. Digestão anaeróbia

A DA tem como objetivo a decomposição da matéria orgânica e/ou inorgânica na ausência de oxigénio molecular. Os micro-organismos responsáveis pela decomposição da matéria orgânica dividem-se frequentemente em dois grupos:

- Acidogénicos: este primeiro grupo transforma os ácidos simples, álcoois e aldeídos.
- Metanogénicos: este segundo grupo transforma os ácidos orgânicos simples formados pelo primeiro grupo em gás neutro, anídrico carbónico e água como produtos finais, conseguindo-se dessa forma uma matéria sólida bem estabilizada, apta para a sua descarga para uma zona de secagem e desidratação ou para o seu aproveitamento agrícola.

O correto dimensionamento de um processo de DA tenderá a manter num equilíbrio dinâmico os dois grupos de micro-organismos, para que, em função da matéria orgânica a digerir, da taxa de crescimento dos micro-organismos e da temperatura de funcionamento do sistema, se obtenha um aproveitamento ótimo do seu depurador, conseguindo-se uma elevada taxa de gaseificação e uma correta estabilização de resíduo, com o melhor retorno económico.

A digestão realiza-se em duas etapas, em digestores cilíndricos, com um sistema de operação de alta carga, um período de retenção de 18 dias na 1ª fase e de 4 dias na 2ª fase, com aquecimento exterior, rede de gás e agitação.

Este processo de DA apresenta um conjunto de variáveis que convém ter em conta aquando do seu dimensionamento e manutenção, tais como: bactérias, temperatura, agitação, valor do pH, entre outros. No capítulo 4 do presente trabalho, faz-se a descrição deste tema da DA em profundidade.



### 3.3.10.1. Digestor primário

As lamas misturadas e espessadas passam para os dois digestores primários de 30 m de diâmetro e 9,10 m de altura cilíndrica útil, sendo o seu volume unitário de 6.432 m<sup>3</sup>. A cobertura é uma cúpula esférica de 12 cm de espessura, esquadrelada no seu vigamento no muro cilíndrico. Esta disposição, comparada com a possibilidade de a deixar simplesmente apoiada através de uma braçadeira, evita possíveis fugas de gás e de líquido por essa junta.

A extração das lamas do digestor faz-se a partir de três pontos diferentes, por meio de um grupo de válvulas situadas numa caixa, conseguindo-se à saída, que as lamas saiam quer para a tubagem de descarga de fundo quer para a caixa situada na parte superior do digestor primário, donde são encaminhadas para o digestor secundário. Existe uma toma situada a meia altura para extração de lamas para a recirculação de aquecimento.

Em boas condições de funcionamento não devem ocorrer transbordamentos do digestor, no caso de ocorrer dispõe-se de um sistema de segurança cuja saída descarga as lamas para a caixa superior, através de uma tubagem em “U” que comunica com a superfície do digestor, podendo ser regulada exteriormente através de um anel.



Figura 24 – Digestores Primários.

### 3.3.10.2. Digestor secundário

As lamas extraídas dos digestores primários passam para o digestor secundário onde se produz o espessamento por gravidade.

Existe um digestor secundário de 22 m de diâmetro, com uma altura cilíndrica útil de 7,5 m e uma altura cônica útil de 2,75 m, um volume total de 3.200 m<sup>3</sup>, permitindo um tempo de retenção mínimo de 4,51 dias. Sobre o digestor secundário instalou-se um gasómetro de 21,3 m de diâmetro e com 4 m de curso vertical útil, que proporcionará um tempo de armazenamento real mínimo relativamente à produção média de gás de 3,83 horas e um volume total de 1425 m<sup>3</sup>. O digestor secundário tem duas funções fundamentais:

- servir de espessador por gravidade das lamas já digeridas, aumentando a sua concentração para 4-5 %, para posterior desidratação mecânica;
- servir de reservatório de regularização para a desidratação mecânica.

O sobrenadante produzido por efeito do espessamento é encaminhado para a “cabeça” da estação. As lamas são extraídas pelo fundo do digestor para posterior desidratação.



Figura 25 – Digestor secundário com gasómetro.

### 3.3.10.3. Linha de gás

O gás produzido na digestão é armazenado num gasómetro tipo sino flutuante instalado sobre o respetivo digestor secundário com um anel de fecho provido dos correspondentes elementos de funcionamento e segurança. O gás metano é posteriormente utilizado no processo de aquecimento das lamas em digestão por meio de caldeiras de água quente, na produção de energia elétrica por meio de motogeradores, ou ainda para a queima do gás em excesso, através de um circuito em “by-pass”, numa flare. A saída do gás do digestor e do gasómetro, em baixa pressão, é feita através de uma tubagem de aço com passamuros em aço inoxidável, provida de válvula de seccionamento. A queima do gás em excesso é provida de chama piloto e de um dispositivo anti-retorno para as chamas, equipado com câmara anti-explosão, sob um alpendre situado num dos extremos das instalações.



Figura 26 – Queima do gás em excesso na flare (tocha).

### 3.3.10.4. Dessulfurização

O gás obtido nos digestores contém na sua composição elementos indesejáveis que é necessário eliminar para evitar fenómenos de corrosão em caldeiras, motogeradores e outros equipamentos. Estes gases, principalmente ácido sulfídrico, dióxido de carbono, em

baixas concentrações da ordem dos 0,4%, eliminam-se por diversos processos, destacando-se de entre eles o processo de absorção com soda cáustica. Uma parte do gás produzido, que é empregue no motor a gás e na caldeira, antes de ser comprimido é encaminhado para uma torre de absorção para que se proceda à dessulfurização, torre essa onde é eliminado parte do ácido sulfídrico e dióxido de carbono por meio de uma lavagem em contracorrente com soda cáustica. O gás é introduzido pela parte inferior da torre e sai pela parte superior ao mesmo tempo que uma solução de hidróxido de sódio é bombada para a parte superior da torre e distribuída uniformemente por meio de um aspersor. O líquido absorvente circula pois em sentido descendente enquanto o gás de digestão é obrigado a circular em sentido ascendente. Um material de enchimento serve de suporte e põe em contacto os fluidos, facilitando assim a reação química.

#### **3.3.10.5. Aquecimento das lamas**

A instalação de aquecimento é necessária para manter a temperatura de digestão nos 35°C, por ser esta a ideal para a ação das bactérias e micro-organismos que intervêm neste processo. No edifício de tratamento de lamas e cogeração, situado perto dos digestores primários, estão instalados: o aquecimento das lamas, os motogeradores a gás assim como o equipamento de agitação e rotura de crostas dos digestores.

A instalação de aquecimento está ligada aos motogeradores, já que o aquecimento das lamas pode ser obtido por dois sistemas:

- se os motogeradores não estão em funcionamento: o calor necessário é produzido por duas caldeiras;
- se os motogeradores estão em funcionamento: o calor necessário é fornecido pelo circuito de refrigeração interno do motor e pelo circuito dos gases de escape.

Resumidamente, a ETAR dispõe de um sistema de aquecimento que inclui os seguintes elementos:

- duas caldeiras com queimador metano-propano de 550 000 kcal/hora de potência unitária, para água quente e permutadores tipo espiral.
- dois permutadores de calor do tipo em espiral com capacidade unitária de 550 000 kcal/hora.
- três bombas de água quente de 110m<sup>3</sup>/hora a 8 m.c.a.
- três bombas de lamas quentes de 110 m<sup>3</sup>/hora a 8 m.c.a.
- duas bombas de recirculação da água da caldeira de 110 m<sup>3</sup>/hora a 6 m.c.a.
- três sobrepessores para gás, de 150 m<sup>3</sup>/h de caudal unitário a 600 mm.c.a.
- conjunto de válvulas, automatismo e instrumentação.

### **3.3.11. Desidratação das lamas**

#### **3.3.11.1. Filtros banda**

A secagem das lamas é feita utilizando filtros de bandas, com os quais se espera obter uma concentração das lamas à saída da ordem dos 22%. As instalações de secagem foram projetadas para, com três filtros em funcionamento, tratar num período de funcionamento de seis dias por semana, em dez horas de trabalho por dia, a carga de lamas produzidas semanalmente na estação de tratamento. Para o acondicionamento químico deste tipo de lamas utiliza-se polieletrólito. Este reagente, adicionado em pó, é diluído em três cubas, onde os electro-agitadores o misturam com água limpa até se obter a concentração de trabalho (0,5%). A saída da última cuba alimenta quatro bombas de parafuso helicoidal, com um caudal variável entre 180 e 1000 l/h. Estas bombas alimentam os três filtros de bandas, ficando uma delas de reserva. O caudal do polieletrólito diluído é injetado nas tubagens de compressão das lamas digeridas. As lamas

provenientes da digestão são aspiradas por quatro bombas (1 de reserva), de caudal variável entre os 12 e os 18 m<sup>3</sup>/h a 10 m.c.a de altura manométrica. Estas bombas enviam as lamas por meio de três condutas, nas quais se adiciona a solução de polieletrólito, para os flocladores dos filtros.

O filtro de bandas de 2,50 m de largura é constituído por duas partes bem diferenciadas: o compartimento de floclação, com um tempo de retenção de 1 a 3 minutos, cilíndrico, com um agitador em forma de hélice, e o filtro propriamente dito, formado por duas bandas de tela entre as quais se introduz a lama a secar. As duas bandas são guiadas por uma série de rolos que, à medida que a lama avança, se vão aproximando, e portanto comprimindo-a, extraíndo assim a água que contém. Um dos rolos de cada banda dispõe de um mecanismo pneumático que mantém a tensão das bandas. Diversas bandejas colocadas a todo o comprimento do filtro recolhem a água de filtração, enviando-a para a câmara de drenagem da ETAR. Uma vez que as lamas secas tenham sido descarregadas e antes que se reinicie a filtração, um conjunto de aspersores situados a toda a largura da tela projetam na superfície da mesma água em pressão, lavando-a e arrastando os sólidos que tenham ficado a ela aderentes. As águas de lavagem e de filtração são encaminhadas para o início (pré-tratamento) da linha de tratamento da água residual. A manutenção da pressão da banda filtrante obtém-se através de dois compressores de ar e a administração de água em pressão para a lavagem das telas através de quatro bombas (1 de reserva) de 24 m<sup>3</sup>/h de caudal unitário a 70 m.c.a.

A descarga do bolo de lamas secas é efetuada por meio de um parafuso transportador e de duas bombas de lamas desidratadas, que o encaminham para um silo de armazenamento.



Figura 27 – Filtros banda.

### 3.3.11.2. Armazenamento das lamas

Por forma a possibilitar o armazenamento de lamas secas, existe um silo de armazenamento com 125 m<sup>3</sup> de capacidade, o que proporciona um período de armazenamento de 1,46 dias. A sua alimentação é feita a partir do edifício de desidratação através de uma bomba de parafuso especial para a transferência de lamas secas; a partir desta serão carregados os camiões que transportarão as lamas ao local de vazadouro. A abertura do silo efetua-se por comporta monitorizada e as escorrências que se possam produzir serão encaminhadas para a rede de drenagem.



Figura 28 – Silo de armazenamento das lamas.

### 3.3.12. Instrumentação e controlo

#### 3.3.12.1. Elementos de controlo

A ETAR Norte está equipada com elementos primários para aquisição de dados, tais como: caudais, pH, oxigénio, temperatura, etc., cujos sinais são enviados para o quadro de comando para a sua totalização e registo.

Seguidamente descreve-se o sistema de controlo instalado, indicando-se quais as variáveis a medir e a controlar:

##### *a) Medição dos caudais de água bruta e de água tratada*

A medição dos caudais é realizada em canal, através de um medidor tipo Parshall. O sistema de medição utilizado é do tipo ultra-sónico, o qual permite a medição de caudais sem contacto com o fluido e que se fundamenta no facto de as ondas não audíveis emitidas por uma fonte sonora se refletirem na superfície do líquido e serem novamente recebidas no emissor. O tempo de ida e volta será transformado num sinal de saída proporcional ao nível. No caso de perda do sinal de saída, um dispositivo de segurança deteta a falha, atuando nesse instante uma unidade amplificadora do sensor, que amplificará o referido sinal até 4-20 mA.

##### *b) Medição do pH da água afluenta, da água tratada e do digestor primário*

Com a finalidade de medir a alcalinidade ou a acidez da água afluenta, da água tratada e do digestor primário, existe na caixa de entrada um medidor de pH, assim como no depósito de água tratada e nos digestores primários. O sistema utilizado é o do eletrodo de vidro, que consiste num tubo de vidro fechado na sua parte inferior com uma membrana de vidro especialmente sensível aos iões  $H^+$ . Na parte interna desta membrana encontra-se uma solução tampão de pH constante dentro da qual está imerso um fio de



prata coberto de cloreto de prata. Ao introduzir um eléctrodo no líquido desenvolve-se um potencial directamente relacionado com a concentração do ião  $H^+$  no líquido. Se esta concentração é maior do que a do interior do eléctrodo, existe um potencial positivo através da ponta do eléctrodo e se é inferior, o potencial é negativo. Este potencial varia com a temperatura, pelo que é necessário introduzir na solução um segundo eléctrodo de referência. Este novo eléctrodo, para além de fechar o circuito, aplica um potencial constante que serve de referência para medir o potencial variável do eléctrodo de vidro.

*c) Medição do oxigénio dissolvido*

Existem medidores de oxigénio dissolvido nos tanques de arejamento e na obra de entrada. O oxigénio dissolvido é a quantidade de oxigénio livre na água que não se encontra combinado nem com o hidrogénio nem com os sólidos existentes na água. A quantidade de oxigénio dissolvido é vital para a vida marinha, já que se não existisse esta morreria. O teor em oxigénio dissolvido é influenciado pela temperatura, daí que seja necessário incorporar termocompensadores no circuito que relacionam automaticamente a medida efetuada com uma temperatura standardizada.

*d) Medição do caudal das lamas primárias, das lamas em excesso, da recirculação, da mistura e das lamas digeridas*

A medição destes fluidos é feita através de medidores do tipo eletromagnéticos. Este equipamento está instalado nas condutas de compressão das respetivas bombas. O seu princípio de funcionamento fundamenta-se na lei de Faraday, que estabelece que a corrente induzida através de qualquer condutor que se mova perpendicularmente através de um campo magnético é proporcional à velocidade.

*e) Medição da temperatura do digestor primário, das lamas e da água quente*

Esta medição efetua-se utilizando uma termoresistência, dependendo a medição das características da resistência em função da temperatura que são próprias do elemento de deteção. O elemento consiste normalmente de um enrolamento de fio muito fino de um condutor adequado (bobine) entre camadas de material isolante e protegido com um revestimento de vidro ou cerâmica.

*f) Rede de instrumentação*

Existem ainda os seguintes elementos:

- Medição do caudal de gás consumido nas caldeiras.
- Medição do caudal de gás consumido em cada um dos motogeradores.
- Medição do caudal de gás produzido em cada um dos digestores primários.

### **3.4. Acompanhamento da empresa**

O estágio na ETAR Norte tinha como propósito a otimização da produção de biogás, contudo o estágio não se limitou apenas a atingir este objetivo. Durante o período de estágio decorreram atividades habituais na empresa, foi-me proposto participar em algumas dessas atividades.

Num primeiro contacto com a empresa foi feito acolhimento que me permitiu conhecer a empresa, a forma de funcionamento e a ETAR Norte, na qual seria realizado o estágio, foi ainda oferecido equipamento de proteção individual, botas de biqueira de aço.

Durante os primeiros meses de estágio foi possível acompanhar as obras de reabilitação do espessador de lamas da ETAR.

Decorreram ainda outras atividades na ETAR, nomeadamente participação num simulacro de incêndio, acompanhamento de visitas de estudo que foram feitas por

estudantes e ainda visita a uma obra de execução de uma cortina de estacas prancha devido à rotura de uma conduta numa estação elevatória.

No último mês de estágio decorreram formações para os elementos da SIMRIA, algumas dessas formações ocorreram na ETAR e foi-me permitido participar em duas formações: Formação de Primeiros Socorros e Ergonomia no Trabalho.

## Capítulo 4.

### DIGESTÃO ANAERÓBIA

No presente capítulo descreve-se o processo da DA, são ainda identificados os fatores ambientais que interferem neste processo, cujo impacto para o caso em estudo, da otimização da produção de biogás, é crucial. Por último, são apresentados os diferentes digestores existentes para este tipo de processo, bem como as características físicas e microbiológicas da biomassa desenvolvida nos mesmos.

#### 4.1. Processo de degradação anaeróbio

A DA é um processo mediado por uma comunidade complexa de microrganismos que promovem a degradação da matéria orgânica, na ausência de oxigénio, permitindo, deste modo, a estabilização bioquímica de resíduos orgânicos. O bom funcionamento do processo está dependente da ação cooperativa e sequencial de diversas bactérias de diferentes grupos tróficos. As bactérias anaeróbias de diferentes grupos tróficos apresentam muitas vezes relações de sintrofia (benefício mútuo), cooperando entre si de modo a aproveitar de forma eficiente quantidades muito reduzidas de energia que normalmente se verificam no processo de conversão da matéria orgânica em metano. Este processo tanto pode ocorrer naturalmente no ambiente como em digestores em ambiente controlado (Silveira, 2009).

Como refere Florindo (2009), a DA tem vindo a tornar-se um processo biológico cada vez mais atrativo, no tratamento de efluentes de elevada carga orgânica ou das lamas resultantes do tratamento de águas residuais. A matéria orgânica destes efluentes pode sofrer uma série de transformações que dão origem a um gás rico em metano (biogás) passível de ser usado para a produção de energia e um resíduo com um baixo teor em

matéria orgânica. O biogás é constituído essencialmente por metano (aproximadamente 65%) e dióxido de carbono (cerca de 35%), e o produto digerido é constituído por biomassa microbiana. O biogás produzido possui um poder calorífico de aproximadamente 21-25 MJ/m<sup>3</sup>, cerca de 30-40% inferior ao do gás natural (Silveira, 2009).

No processo de DA podem ser utilizados diferentes tipos de substratos, nomeadamente: lamas domésticas, resíduos resultantes da atividade agro-pecuária (estruume de vacas, porcos e aves), fração orgânica dos resíduos sólidos municipais e efluentes resultantes da atividade industrial (indústria de bebidas, produtos alimentares, amido, açúcar, processamento de papel, matadouros, químicos, leite, cosméticos, entre outros). A composição do biogás depende da composição do substrato. Por exemplo, as gorduras dão origem a níveis elevados de produção de metano (Florindo, 2009).

O processo anaeróbio pode ser dividido em quatro fases interdependentes: (Silveira, 2009):

- Hidrólise extracelular da matéria complexa particulada nos respetivos monómeros (açúcares e aminoácidos);
- Acidogénese dos açúcares e aminoácidos em ácidos gordos voláteis (AGV) e álcoois;
- Acetogénese sintrófica, onde os álcoois e AGV são convertidos a acetato, hidrogénio ou formato. Esta fase ocorre em sintrofia com as bactérias metanogénicas (BM);
- Metanogénese, onde o acetato, hidrogénio e formato são convertidos em metano.

Pode ainda identificar-se uma quinta fase que ocorre em simultâneo com as restantes quatro, designada *sulfidogénese*.

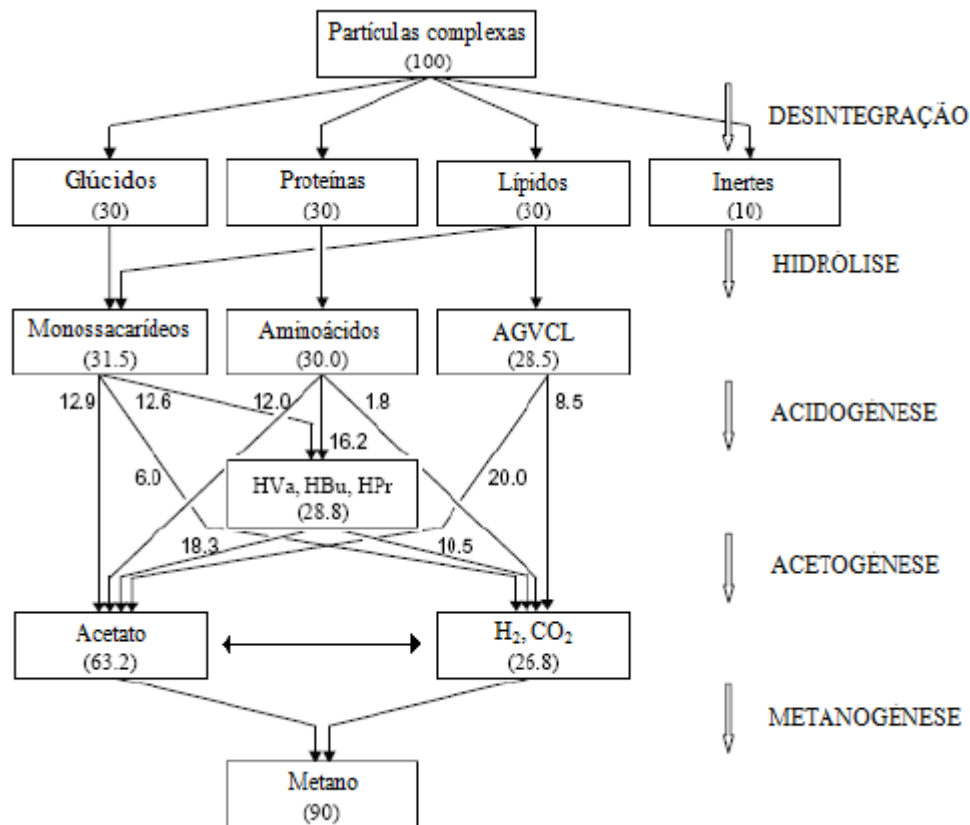


Figura 29 – Esquema com as várias fases do processo e os produtos formados durante a DA (Fonte: Silveira, 2009).

#### 4.1.1. Hidrólise

Como refere Silveira (2009), na primeira fase da DA, hidrólise, as enzimas hidrolíticas extracelulares degradam compostos de elevado peso molecular (glúcidos, proteínas e lípidos), em compostos monoméricos e oligoméricos solúveis. Os glúcidos são hidrolisados a monossacáridos, as proteínas a aminoácidos e os lípidos a ácidos gordos voláteis de cadeia longa (AGVCL) e glicerol. O bom funcionamento do processo de hidrólise está dependente do contacto eficiente entre a biomassa e o substrato. Durante a degradação das proteínas é libertado azoto sob a forma de amónia.

O processo de hidrólise envolve várias fases, tais como: produção de enzimas, difusão, adsorção, reação e a desativação da enzima. A eficiência da atividade enzimática depende, de vários fatores como composição e concentração do substrato, produção e

estabilidade das enzimas, disponibilidade de substrato, pH, temperatura do líquido em digestão e concentração de AGV. A velocidade do processo de hidrólise de gorduras depende fundamentalmente do comprimento das cadeias dos AGV, do estado do substrato (sólido ou líquido) e da área superficial específica. A velocidade do processo de hidrólise de proteínas depende fundamentalmente da sua composição (globular ou fibrosa), área superficial e solubilidade. A presença de concentrações elevadas de amónia no líquido em digestão pode inibir o processo de hidrólise, uma vez que provocam uma redução da produção enzimática. A hidrólise é geralmente a fase limitante da velocidade do processo anaeróbio quando o substrato em digestão é constituído por um teor elevado de sólidos e partículas como os efluentes de suínos, bovinos e lamas domésticas. Quando são utilizados substratos de composição simples e facilmente biodegradáveis, a metanogénese ou a acetogénese apresentam-se, normalmente, como o passo limitante do processo anaeróbio. A baixa velocidade do processo de hidrólise pode resultar na acumulação de sólidos suspensos, resultando numa diminuição da atividade metanogénica e na eficiência de remoção da carga orgânica (Silveira, 2009).

#### **4.1.2. Acidogénese**

De acordo com Silveira (2009), durante a acidogénese, ou fermentação ácida, os produtos resultantes da fase de hidrólise são degradados pelas bactérias fermentativas (BF), constituídas por uma série de estirpes bacterianas anaeróbias. Estas bactérias possuem um metabolismo variado, apresentando diferentes vias de conversão donde resultam produtos fermentativos diversos, essencialmente AGV (propionato, butirato, valerato), succinato, lactato e álcoois.

A quantidade e o tipo de produtos obtidos na fase de acidogénese dependem fundamentalmente da pressão parcial de gás hidrogénio no digestor, que está associada à

atividade de bactérias utilizadores de hidrogénio, como por exemplo algumas espécies de BM e bactérias redutoras de sulfatos (BRS).

Nos digestores anaeróbios em boas condições operacionais, a concentração de hidrogénio é normalmente muito baixa devido à enorme capacidade de utilização deste gás por parte das bactérias utilizadoras de hidrogénio, seguindo principalmente a via metabólica que resulta na produção de acetato. Ao atingir um valor de  $\text{pH}=4$  todo o processo fermentativo pode parar. O efeito de concentrações crescentes de substrato tem um efeito análogo ao do abaixamento do  $\text{pH}$ .

#### **4.1.3. Acetogénese**

Silveira (2009) refere que, na acetogénese, as bactérias acetogénicas (BA) procedem à degradação dos compostos formados durante a fase anterior (acidogénese), como AGV (propionato, butirato, valerato), álcoois, alguns aminoácidos e compostos aromáticos. Os produtos resultantes da degradação destes compostos são hidrogénio, formato, dióxido de carbono e acetato, que vão servir de substrato para as BM. O acetato e o propionato são os produtos intermediários que se encontram usualmente em maior quantidade nos digestores anaeróbios. A degradação do propionato é muitas vezes o passo limitante da velocidade de degradação do processo anaeróbio, sendo este oxidado em acetato, bicarbonato, hidrogénio ou formato. Além de beneficiarem da atividade das bactérias metanogénicas hidrogenotróficas (BMH) no consumo do hidrogénio, as BA beneficiam também da atividade das bactérias metanogénicas acetoclásticas (BMA), na medida em que a remoção do acetato é essencial para que a energia livre de Gibbs <sup>1</sup> seja favorável para a ocorrência das reações de oxidação dos AGV, uma vez que a acumulação de acetato

---

<sup>1</sup> A energia livre de Gibbs é uma grandeza que mede a totalidade de energia associada a um sistema termodinâmico disponível para execução de trabalho “útil” (trabalho ligado ao movimento em máquinas térmicas).



pode causar um efeito bioquímico inibitório nas BA, podendo resultar na acumulação de AGV, nomeadamente propionato e butirato. Mesmo com condições ideais (baixas concentrações de acetato e de hidrogénio), a quantidade de energia disponível para suportar a formação de ATP <sup>2</sup> e o crescimento microbiano é muito baixa. A temperatura é outro fator que influencia a termodinâmica das reações de acetogénese. A formação de hidrogénio a partir da oxidação de ácidos orgânicos é energeticamente mais favorável a temperaturas mais elevadas, enquanto o consumo de hidrogénio pelas BM é menos favorável a temperaturas superiores. No entanto, a velocidade de degradação dos ácidos orgânicos aumenta normalmente com temperaturas mais elevadas devido ao aumento da atividade bacteriana, da sua taxa de crescimento e de degradação do substrato.

#### **4.1.4. Metanogénese**

Em conformidade com Silveira (2009), as BM constituem um grupo diverso de microrganismos que obtêm energia para o crescimento a partir de reações que conduzem a produção de metano. Durante a metanogénese, o acetato, o hidrogénio, o dióxido de carbono, o formato, o metanol e a metilamina são convertidos em metano e dióxido de carbono pelas BM. Estas bactérias estão dependentes do bom funcionamento de todas as fases anteriores para o fornecimento dos substratos adequados para a sua atividade. As BM dividem-se em três grupos tróficos que apresentam vias metabólicas diferentes: as BMA, que convertem o acetato em metano; as BMH que convertem o hidrogénio e dióxido de carbono em metano, e as bactérias homoacetoclásticas (BHA) que realizam a inter-conversão entre o acetato, hidrogénio e dióxido de carbono. A capacidade das BMH utilizarem hidrogénio tem um papel regulatório crucial no processo anaeróbio, na medida em que controla os produtos obtidos pela atividade das BF e estabelece as condições

---

<sup>2</sup> Trifosfato de adenosina, adenosina trifosfato ou simplesmente ATP, é um nucleotídeo responsável pelo armazenamento de energia nas suas ligações químicas.

termodinâmicas requeridas para a degradação dos AGV. Em condições normais de operação, a utilização do hidrogénio pelas BMH é mais favorável comparativamente a homoacetogénese, e a utilização do acetato pelas BMA é mais favorável comparativamente à sua oxidação em hidrogénio. As BMH exibem maior atividade em condições de elevada pressão parcial de hidrogénio. Cerca de 60-90% do metano produzido em digestores anaeróbios resulta da degradação do acetato pelas BMA. A incapacidade das BMA em degradar o acetato pode resultar numa descida do pH e na paragem de todo o processo anaeróbio. As BMA são particularmente sensíveis a determinadas condições ambientais como concentrações elevadas de amónia, sais e AGV. Nestas situações, o acetato é convertido em hidrogénio para ser posteriormente convertido em metano pelas BMH. A atividade das BMA é independente da pressão parcial de hidrogénio.

#### **4.1.5. Sulfidogénese**

Silveira (2009) menciona que, durante o tratamento anaeróbio de efluentes com concentrações elevadas de sulfato, sulfito, ou outras formas oxidadas de enxofre, ocorre um passo complementar à metanogénese, designado por sulfidogénese, em que as BRS reduzem estes compostos convertendo-os em sulfuretos.

A produção de sulfuretos durante a sulfidogénese pode apresentar alguns problemas técnicos no funcionamento do processo anaeróbio, como por exemplo:

- A presença de concentrações elevadas de sulfuretos apresentar efeitos tóxicos na atividade das BM, BA e BRS;
- Parte da matéria orgânica da água residual será utilizada pelas BRS, reduzindo, consequentemente, o potencial de produção de metano por parte das BM. Além disso a qualidade do biogás produzido fica reduzida devido ao aumento da fração

de gás sulfídrico no biogás resultante da produção de sulfuretos na fase líquida. A utilização do biogás fica, dependente da remoção da fração de gás sulfídrico;

- Os sulfuretos, em concentrações elevadas, apresentam um odor desagradável e provocam problemas de corrosão em condutas, motores e queimadores. A minimização destes efeitos requer custos acrescidos de manutenção e de investimento;
- Parte dos sulfuretos estão presentes no efluente do reator anaeróbio, provocando uma diminuição da eficiência do tratamento, uma vez que os sulfuretos contribuem para o CQO da água residual. Um tratamento suplementar subsequente torna-se um requisito obrigatório de modo a remover os sulfuretos.

No entanto, a ocorrência do processo de sulfidogênese apresenta algumas vantagens como a remoção dos compostos oxidados de enxofre (sulfato, sulfito e tiosulfato) do efluente e a remoção de metais pesados por precipitação com os sulfuretos, reduzindo o seu potencial tóxico.

As BRS degradam diversos produtos intermediários do processo de mineralização anaeróbio, como os substratos da metanogênese hidrogénio, formato, acetato, metanol e piruvato, assim como propionato, butirato, AGVCL, lactato, etanol, fumarato, succinato, malato e compostos aromáticos.

#### **4.2. Fatores ambientais que interferem com o processo**

Em todos os processos de tratamento biológicos, a remoção eficaz de poluentes e contaminantes depende, não só do potencial metabólico dos microrganismos, mas também da existência de condições ambientais adequadas que permitam a sua atividade.

O processo de DA é efetuado por uma série de variáveis que convém ter em conta aquando do seu dimensionamento e manutenção, tais como:

#### 4.2.1. Temperatura

Silveira (2009), menciona que o controlo da temperatura é crucial para o bom funcionamento do processo, uma vez que este parâmetro influencia a atividade biológica dos microrganismos e, conseqüentemente, a velocidade a que ocorre o processo de digestão e de biodegradação dos compostos.

Como refere (Cavaleiro, 1999), existem diferentes gamas de temperatura nas quais o processo de DA pode ocorrer, sendo conhecidos os três seguintes regimes de temperaturas: regime psicrófilo ( $< 20^{\circ}\text{C}$ ), regime mesófilo ( $20\text{-}45^{\circ}\text{C}$ ), e regime termófilo ( $> 45^{\circ}\text{C}$ ). A diferenciação entre estas gamas, no interior dos reatores, poderá não ser tão clara, devido à existência de bactérias termotolerantes, que exibem atividade em zonas intermédias de temperatura. As gamas termófila e mesófila são privilegiadas para o funcionamento das bactérias envolvidas no processo de DA, observando-se um crescimento máximo das BM para temperaturas entre  $30$  e  $38^{\circ}\text{C}$ , na gama mesófila, e entre  $49$  e  $57^{\circ}\text{C}$ , na gama termófila.

A operação a temperaturas termófilas possibilita a obtenção de maiores taxas de remoção, uma vez que estas estirpes bacterianas possuem taxas de crescimento superiores às mesófilas. Desta forma, torna-se possível a aplicação de cargas orgânicas mais elevadas e a operação com tempos de retenção hidráulicos inferiores.

No entanto, a utilização de temperaturas elevadas também apresenta algumas desvantagens (Silveira, 2009), tais como: aumentar a fração de amónia livre que é inibitória para os microrganismos; aumenta a forma não dissociada de AGV; requer quantidades elevadas de energia para a manutenção da temperatura; proporciona um sobrenadante de pior qualidade com quantidades elevadas de sólidos dissolvidos; gera um maior potencial de ocorrência de problemas de odores e a estabilidade do processo é bastante inferior comparativamente à do regime mesófilo.

Como tal, a utilização de temperaturas termófilas exige maior controlo do processo, comparativamente a digestão mesófila. A manutenção de uma temperatura constante no digestor é crucial para o bom funcionamento do processo anaeróbio, uma vez que flutuações pontuais e/ou frequentes na temperatura do digestor podem provocar efeitos severos nas bactérias, particularmente nas metanogénicas. Além disso, a temperatura tem um efeito significativo na pressão parcial do hidrogénio, influenciando a cinética do metabolismo sintrófico.

Na ETAR Norte da SIMRIA, os digestores operam em regime mesófilo, variando a temperatura de funcionamento entre 32°C e 34°C.

#### **4.2.2. Tempo de Retenção Hidráulico (TRH)**

Silveira (2009) refere que o TRH é um parâmetro fundamental para o dimensionamento de um sistema de tratamento anaeróbio, e exprime o tempo médio que um determinado volume de efluente permanece no digestor. Para um reator com um volume  $V$  ( $m^3$ ), sujeito a uma alimentação com um caudal  $Q$  ( $m^3/d$ ), o TRH é dado pela seguinte expressão:  $TRH = V/Q$ .

O tempo de retenção necessário para que ocorra a decomposição anaeróbia nos reatores varia com as diferentes tecnologias, temperaturas do processo e composição dos resíduos. O tempo de retenção para o tratamento de resíduos em processos mesofílicos e termofílicos varia de 10 a 40 dias e nas zonas termofílicas são requeridos menores TRH. Reatores com alta taxa de sólidos a operar em condições termófilas têm normalmente um TRH de 14 dias (Gonçalves, 2012). A maximização do TRH é preferível para uma maior estabilidade do processo e a minimização da produção de lamas (Silveira, 2009).

No caso em estudo, da ETAR Norte da SIMRIA, o TRH nos digestores é de aproximadamente 21 dias.

### 4.2.3. pH

Cavaleiro (1999) refere que, os microrganismos são altamente sensíveis a variações de pH, embora nem todos os grupos tróficos apresentem o mesmo grau de sensibilidade relativamente a este parâmetro. Cada enzima apresenta atividade para uma determinada gama de pH, exibindo atividade máxima a um valor de pH ótimo. Cada grupo de microrganismos possui uma gama diferente de pH ótimo.

Segundo o mesmo autor, valores de pH entre 7 e 7.4 são ótimos para as bactérias hidrolíticas (BH) e BA e pH 6 é ótimo para as BF. As BM apresentam um ótimo de pH entre 6.6 e 7.6 e, uma vez que são normalmente responsáveis pela cinética global do processo e são mais sensíveis a fatores ambientais, geralmente considera-se esta gama de pH como a apropriada para o funcionamento do processo de DA. O valor do pH afeta o equilíbrio ácido-base dos compostos no digestor. Para valores de pH baixos, os AGV livres podem causar inibição por ácidos fracos, enquanto para valores de pH elevados, a amónia livre pode causar inibição por bases fracas.

Existem compostos que influenciam o balanço do pH, quando presentes em concentrações elevadas como: as várias formas de amónia, sulfuretos e fosfatos. Também a produção de ácidos voláteis como produtos intermediários no processo de DA pode provocar uma descida acentuada do pH do meio, se a alcalinidade do sistema for insuficiente.

### 4.2.4. Alcalinidade

De acordo com Cavaleiro (1999), a alcalinidade é uma medida representativa da capacidade tampão do meio, sendo a capacidade tampão definida como a resistência do processo a variações de pH causadas por diferentes agentes. Permite determinar antecipadamente qual a tolerância em AGV para que o valor de pH se mantenha na gama

pretendida, e está intimamente relacionada com a estabilidade do processo, salientando-se que quanto maior for a capacidade tampão, maior será a resistência a choques orgânicos. Para a maioria dos casos práticos, uma alcalinidade entre 2500 e 5000 mg  $\text{CaCO}_3/\text{L}$  é suficiente para se obter um adequado poder tampão no sistema. Quando o poder tampão do efluente a tratar é fraco, revela-se necessário proceder à correção do pH, através da adição de um reagente alcalino.

#### **4.2.5. Agitação**

De acordo com Silveira (2009), para que o processo de digestão se desenvolva normalmente é necessário que as condições de exploração no interior do digestor sejam as mais homogêneas possíveis, tanto no que respeita à temperatura como às características das lamas, a fim de evitar a estratificação das lamas e consequentemente um funcionamento não uniforme.

A agitação adequada do digestor é fundamental para o funcionamento ótimo do processo de DA. A agitação tem a função de melhorar o contacto entre o substrato do afluente com a biomassa no interior do digestor, possibilitando condições uniformes de temperatura e de concentração de substrato. Além disso, a agitação evita a formação de camadas de espuma superficiais e a deposição de lama no fundo do digestor. Os métodos de agitação auxiliares utilizados vulgarmente são a recirculação exterior da lama, agitação mecânica interna, ou injeção interna do biogás produzido. A injeção interna do biogás é um método eficaz para evitar a formação de uma camada superficial de espuma. A formação de espuma no digestor tem que ser controlada uma vez que esta impede a libertação do biogás do meio líquido, causando a sua sobretensão no digestor. Em diversos estudos efetuados em digestores completamente agitados concluiu-se que a intensidade de

agitação do líquido em digestão tem influência na inibição do processo, assim como na sua recuperação após um desequilíbrio causado por sobrecarga orgânica.

#### **4.2.6. Requisitos nutricionais**

De acordo com Alves (1998), para assegurar a eficiência e estabilidade do processo de degradação anaeróbia é essencial a satisfação dos requisitos nutricionais dos grupos bacterianos presentes, uma vez que a limitação de nutrientes origina um crescimento deficiente. Os processos anaeróbios caracterizam-se por uma baixa produção celular, pelo que as necessidades em nutrientes são, conseqüentemente, reduzidas. As concentrações necessárias encontram-se diretamente relacionadas com a concentração de substrato a utilizar pelos microrganismos, sendo suficientes, em muitos casos, as quantidades presentes no efluente a tratar. A satisfação dos requisitos nutricionais das BM em particular é fundamental, dado que a metanogénese é normalmente a etapa limitante da globalidade do processo de DA.

##### **4.2.6.1. Macronutrientes**

Como refere Alves (1998), os nutrientes necessários em maior quantidade (macronutrientes), durante o processo anaeróbio, são o azoto, fósforo e enxofre. O enxofre é um dos elementos presentes na coenzima M, envolvida nas reações metanogénicas. O sulfureto pode precipitar alguns metais essenciais, tais como o ferro, níquel e cobalto, reduzindo a sua disponibilidade no meio. Embora o ião amónio seja, aparentemente, a fonte de azoto preferida pelas BM, a ureia e a glutamina também podem ser usadas como tal, e várias espécies têm a capacidade de fixar o azoto molecular, num processo energeticamente dispendioso para as células. A adição de ião amónio faz normalmente aumentar a taxa de crescimento das BM, embora um excesso de azoto conduza ao



aparecimento de azoto amoniacal, o qual terá de ser posteriormente eliminado. Quando se revela necessária a adição de fósforo ao digestor, este pode ser fornecido sob a forma de ácido fosfórico ou como um sal de fosfato.

#### **4.2.6.2. Micronutrientes**

Os elementos requeridos pelas BM em quantidades traço (micronutrientes) incluem o sódio, potássio, cálcio, magnésio, ferro, níquel, cobalto, zinco, molibdénio, cobre e manganês. O ferro está presente em proteínas que estão envolvidas no metabolismo como fonte de eletrões. O níquel é um dos constituintes envolvidos nos passos terminais das reações metanogénicas. A deteção de elevados níveis de níquel na membrana celular sugere que este pode estar envolvido na estabilidade estrutural (Alves, 1998).

#### **4.2.7. Toxicidade e inibição**

Silveira (2009) refere que, existem diversos compostos que potencialmente podem ser inibitórios ao processo anaeróbio, como alguns compostos que fazem parte do substrato no afluente, ou sub-produtos resultantes do metabolismo das bactérias. Estes compostos podem abrandar o processo de degradação (toxicidade), ou causar a paragem do processo (inibição).

Em conformidade com Cavaleiro (1999), os processos anaeróbios são efetuados por uma associação microbiana complexa, pelo que os vários grupos bacterianos podem exibir diferentes respostas face a uma determinada substância tóxica. As BM são particularmente suscetíveis a uma larga gama de componentes, sendo geralmente as acetoclásticas as mais sensíveis à toxicidade, embora alguns compostos possam ter um maior efeito inibitório sobre os microrganismos acidogénicos.

Alguns compostos responsáveis por estes fenómenos são amónia, sulfuretos, metais pesados, metais alcalinos e metais alcalino-terrosos. Dependendo dos efeitos que provocam, os compostos inibitórios podem ser classificados em: inibidores metabólicos (causam uma inibição reversível); inibidores fisiológicos (os seus efeitos mantêm-se durante algum tempo após o desaparecimento da substância do meio); ou agentes bactericidas (conduzem à morte da flora bacteriana).

Uma vez que estas substâncias afetam principalmente as etapas acetogénica e metanogénica do processo de DA, as suas consequências imediatas poderão ser muito similares às resultantes de choques orgânicos, térmicos ou hidráulicos, provocando uma diminuição da produção de metano e posterior acidificação do reator.

#### **4.2.7.1. Amónia**

A amónia é um composto libertado durante a hidrólise através da degradação biológica da matéria azotada que se encontra presente essencialmente na forma de proteínas. Apesar de a amónia ser essencial para o crescimento bacteriano, este pode inibir o processo da digestão quando presente em concentrações elevadas. O íão amónio e a amónia livre são as duas formas predominantes de azoto inorgânico presente no líquido em digestão. A amónia livre é a forma mais tóxica, uma vez que possui a capacidade de penetrar as paredes das células por difusão passiva, causando uma desregulação no balanço protónico e/ou uma deficiência em potássio. A forma ionizada apresenta um efeito benéfico para o processo associada à produção de hidróxido que reage com o dióxido de carbono no gás, formando bicarbonato. A produção de bicarbonato é importante uma vez que aumenta a capacidade tampão do líquido em digestão. A concentração de amónia livre depende fundamentalmente da concentração total de amónia, da temperatura, do pH e da pressão do  $\text{CO}_2$ . Um aumento de temperatura e /ou uma subida do valor de pH provocam

um aumento do nível de toxicidade associada ao aumento da fração de amónia livre comparativamente a forma ionizada. Uma diminuição da pressão parcial de dióxido de carbono tem o mesmo efeito (Silveira, 2009).

#### 4.2.7.2. Sulfuretos

Tal como Silveira (2009) menciona, em termos energéticos, o sulfureto é a forma mais estável do enxofre em ambiente anaeróbio. O sulfureto é altamente reativo, corrosivo e tóxico para microrganismos, plantas, animais e para o homem. Consequentemente, os problemas associados ao tratamento de águas residuais com uma concentração elevada em sulfatos derivam essencialmente da produção de sulfuretos pelas BRS. A inibição causada pela redução do sulfato a sulfuretos ocorre em duas fases: inibição primaria devido a competição pelas BRS pelo mesmo substrato orgânico e inorgânico, acabando por suprimir a produção de metano; e inibição secundária resultante da toxicidade dos sulfuretos produzidos para diversos grupos de bactérias.

Os sulfuretos são tóxicos tanto para as BM como para as BRS. Os sulfuretos produzidos em reatores anaeróbios encontram-se distribuídos em solução em várias formas distintas: sulfureto ( $S^{2-}$ ), hidrogenossulfureto ( $HS^-$ ) e ácido sulfídrico ( $H_2S$ ) em solução;  $H_2S$  no biogás; e ainda sulfuretos metálicos insolúveis. As BF e BA são menos sensíveis à inibição provocada por sulfuretos comparativamente as BM. O grau de inibição provocado pelos sulfuretos depende do pH, temperatura, concentração de iões metálicos e tipo de digestor.

A biomassa imobilizada é mais resistente à ocorrência de inibição comparativamente à biomassa em suspensão. Algumas das técnicas utilizadas para a remoção de sulfuretos incluem processos físico-químicos, reações químicas (coagulação, oxidação, precipitação), ou conversões biológicas (oxidação parcial a enxofre elementar). A

produção de sulfuretos pode apresentar efeitos benéficos no processo de digestão como: provocar a precipitação de metais pesados tóxicos (crómio, cobre e zinco), cujos precipitados são bons precursores para a formação de grânulos, e aumentarem a alcalidade no digestor derivado da produção de bicarbonato.

#### **4.2.7.3. Ácidos Gordos Voláteis (AGV)**

De acordo com Silveira (2009), os AGV são os principais produtos intermediários formados durante o processo de DA. Concentrações elevadas de AGV no líquido em digestão são resultado de perturbações que se verificam no processo, nomeadamente variações na temperatura, sobrecarga orgânica, ou presença de compostos tóxicos. Nestas situações, as BM são incapazes de remover o hidrogénio e os AGV produzidas pelas BF e BA. Face a esta situação, ocorre a acumulação de ácidos no digestor que leva a uma descida do pH a níveis que podem ser inibitórios para as BM, que ficam ainda mais inibidas. Além do pH, a concentração inibitória de AGV depende também do poder tampão (alcalinidade) no reator. A acumulação de ácidos no digestor pode resultar na paragem de todo o processo.

#### **4.2.7.4. Metais pesados**

Como refere Silveira (2009), os metais pesados encontram-se usualmente em quantidades significativas nos efluentes industriais e no esgoto doméstico. Os principais metais pesados cuja presença no esgoto é mais comum podendo tornar-se problemática a partir de determinadas concentrações são o crómio, ferro, cobalto, cobre, zinco, cádmio e níquel. Uma característica particular dos metais pesados reside no facto de, ao contrário das outras substâncias tóxicas, estes não serem biodegradáveis, podendo acumular-se até

atingirem concentrações potencialmente tóxicas. O efeito tóxico derivado da presença de metais pesados é atribuído a disrupção do funcionamento e estrutura das enzimas.

O efeito de estimulação ou inibição dos microrganismos anaeróbios é determinado pela concentração total de metais, as formas químicas em que se encontram os metais, pH e potencial redox. A solubilidade dos metais aumenta para valores de pH mais reduzidos. A toxicidade causada por metais pesados está mais correlacionada com a concentração iónica na forma livre do metal do que com a sua concentração total.

De um modo geral as BF e BA são mais resistentes à toxicidade causada por metais pesados comparativamente às BM.

A quantidade de sólidos presentes no digestor é um fator que tem muita influência na toxicidade relacionada com metais pesados. Quanto maior o teor em sólidos menor a suscetibilidade do sistema entrar em inibição devido a concentração de metais pesados.

#### **4.2.7.5. Metais alcalinos e alcalino-terrosos**

Em conformidade com Silveira (2009), a adição excessiva de sais ao digestor com o objetivo de controlar o valor de pH, pode resultar na inibição do processo anaeróbio.

Os metais alcalinos e alcalino-terrosos são benéficos ao processo anaeróbio, estimulando as bactérias. No entanto, quando presentes em concentrações excessivas tornam-se inibitórios.

A concentração em nutrientes, o período de aclimação e a ocorrência de sinergismo e de antagonismo são os fatores que influenciam a inibição provocada por iões.

A utilização de magnésio, ou o efeito combinado dos iões cálcio e potássio, pode ser muito eficaz na redução da toxicidade provocada pelo sódio, enquanto o efeito combinado do cálcio e sódio pode ser eficaz na redução da toxicidade provocada pelo potássio.

### 4.3. Tipos de reatores anaeróbios

Os reatores anaeróbios convencionais podem operar em modo descontínuo, contínuo, ou semi-contínuo. No processo descontínuo, a matéria orgânica é introduzida na sua totalidade no interior do reator, ficando retida durante um determinado período de tempo até ao final do processo de degradação. No processo contínuo a alimentação é introduzida de forma contínua enquanto na semi-contínua é introduzida de modo intermitente. A operação em modo contínuo e semi-contínuo são preferíveis, uma vez que permitem o crescimento constante dos microrganismos através do controlo do caudal de alimentação. A escolha do tipo de reator é determinada pelas características do resíduo, especialmente pelo conteúdo em partículas sólidas (Silveira, 2009).

#### 4.3.1. Reator de mistura completa

Este tipo de digestores é agitado de modo a que o substrato esteja completamente homogeneizado no seu interior. A alimentação pode ser realizada de modo contínuo ou intermitente.

Nos reatores de mistura completa, a biomassa encontra-se suspensa no líquido em digestão e será removida em conjunto com o efluente, pelo que o tempo de retenção de sólidos é igual ao tempo de retenção hidráulico. Como tal, a sua operação está dependente do crescimento contínuo de nova biomassa de modo a substituir a que se perde pelo efluente. O crescimento das bactérias anaeróbias é bastante lento, particularmente algumas estirpes de BM que possuem um tempo de duplicação de 5 a 10 dias. Por este facto, o TRH deste tipo de digestores nunca deve ser inferior a 10 dias, de modo a assegurar um tratamento eficaz e um quantitativo populacional adequado no interior do digestor.

A utilização deste tipo de digestores requer volumes elevados para compensar o tempo necessário para o seu tratamento, a perda de biomassa durante a sua operação impossibilita a sua utilização para a maioria dos efluentes industriais. No entanto, as lamas domésticas, assim como efluentes com elevado teor de sólidos e de matéria orgânica, podem ser utilizadas com sucesso neste tipo de digestores, permitindo a reposição dos microrganismos no interior do digestor (Silveira, 2009).

Os digestores da ETAR Norte da SIMRIA, objeto de estudo do presente trabalho, são reatores de mistura completa, com alimentação contínua, agitação e aquecimento por recirculação exterior de lamas, com sistemas independentes de bombagem.

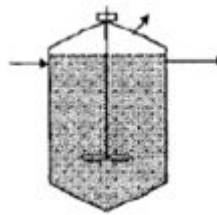


Figura 30 – Reator de mistura completa (Fonte: Silveira, 2009).

#### 4.3.2. Reator de contacto

O princípio do reator de contacto reside na aplicação de um segundo órgão onde a lama é decantada e recirculada de volta para o primeiro reator, permitindo um maior período de contacto da biomassa com o substrato.

Devido à recirculação da lama, neste tipo de digestores o Tempo de Retenção de Sólidos (TRS) é superior ao TRH, permitindo uma maior eficiência no tratamento comparativamente ao digestor completamente agitado. A agitação adequada destes digestores é essencial para que a transferência de massa entre a alimentação e a biomassa ativa ocorra de modo eficaz.

A maior desvantagem da aplicação destes digestores resulta do facto da sua operacionalidade estar dependente do bom funcionamento do reator de sedimentação, que

por vezes está condicionado devido ao crescimento de bactérias anaeróbias filamentosas e produção de biogás que dificultam o processo de sedimentação (Silveira, 2009).

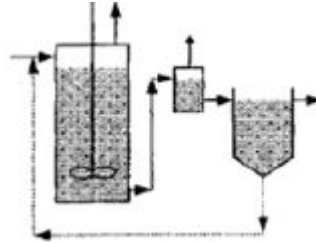


Figura 31 – Reator de contacto (Fonte: Silveira, 2009).

#### 4.3.3. Reator anaeróbio descontínuo sequencial

Este tipo de digestor opera segundo um ciclo sequencial constituído por 4 fases: alimentação, reação, sedimentação, e decantação. A alimentação e decantação processam-se em modo descontínuo, enquanto o crescimento se processa num sistema em suspensão. Todas estas fases ocorrem num único digestor.

No entanto, uma parte significativa do tempo despendido neste ciclo está associada à sedimentação da biomassa do efluente tratado, pelo que os requisitos de volume são superiores comparativamente aos reatores que operam em contínuo. Esta desvantagem é contrabalançada pela sua enorme simplicidade, não necessitando de uma fase subsequente de sedimentação nem de reciclagem da biomassa (Silveira, 2009).

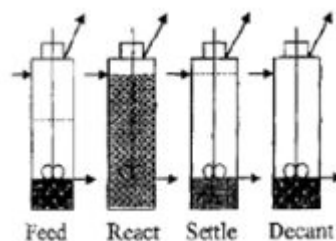


Figura 32 – Reator anaeróbio descontínuo sequencial (Fonte: Silveira, 2009).



#### 4.3.4. Reator de filtro anaeróbio

O filtro anaeróbio é um processo de tratamento onde é utilizado um filme biológico fixo, no qual uma matriz fixa (meio de suporte) providencia uma superfície de aderência que suporta os microrganismos. As bactérias formam um filme biológico que é sustentado pela assimilação dos nutrientes e dos poluentes da água residual que circula em fluxo ascendente. Este filme desprende-se periodicamente, saindo com o efluente ou sedimentando no fundo do tanque.

Os filtros anaeróbios foram o primeiro sistema implementado que eliminou a necessidade de se proceder a separação de sólidos e reciclagem, possibilitando TRS bastante superiores ao TRH. Nestes sistemas podem ser utilizados diversos tipos de materiais de suporte como plástico, carvão ativado granular, areia, polímeros expandidos reticulares, granito e quartzo.

Os reatores de filtro anaeróbio apresentam a vantagem de ser extremamente resistentes a choques de carga orgânica e outras perturbações operacionais, como pH e compostos inibitórios, tornando-o ideal tanto para o tratamento de águas residuais solúveis diluídas como para as solúveis de elevada carga orgânica que podem ser diluídas por reciclagem.

As limitações associadas à utilização dos filtros anaeróbios estão associadas à deterioração da estrutura do leito, derivado da acumulação progressiva de sólidos não biodegradáveis, tornando desadequada a sua utilização para o tratamento de efluentes com elevado teor de sólidos. Outra desvantagem reside no facto dos custos associados a esta tecnologia serem consideravelmente elevados (Silveira, 2009).

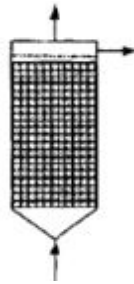


Figura 33 - Reator de filtro anaeróbio (Fonte: Silveira, 2009).

#### 4.3.5. Reator de leito fluidizado/leito expandido

O reator de leito fluidizado surgiu de uma tentativa de solucionar as dificuldades associadas a separação da biomassa em reatores de mistura completa e reatores de contacto. Para solucionar o problema pretendeu-se construir um reator que acumulasse por aderência a maior quantidade de biomassa ativa possível, permitindo de igual modo acumular os sólidos suspensos mais finos. Com este reator atingiu-se uma maior atividade específica da biomassa por volume de reator, maximizando a área superficial disponível para a aderência das bactérias e minimizando o volume ocupado pelo meio. O filtro contém partículas extremamente reduzidas e a operação é realizada em fluxo ascendente de modo a permitir a fluidização do meio.

No reator de leito fluidizado, a biomassa vai aderir à superfície de partículas de reduzidas dimensões que são mantidas em suspensão pelo fluxo ascendente. O efluente é reciclado de modo a diluir o resíduo afluyente e a providenciar fluidez ao fluxo ascendente de modo a manter as partículas em suspensão. A elevada área superficial de suporte das partículas e a agitação que resulta do elevado fluxo ascendente permite o desenvolvimento de elevada concentração de biomassa e uma eficiente cinética associada ao substrato, respetivamente.

O maior risco durante a operação do reator de leito fluidizado/expandido está na perda de partículas de biomassa do interior do reator derivado de alterações bruscas na densidade das partículas, caudal, ou produção de gás (Silveira, 2009).

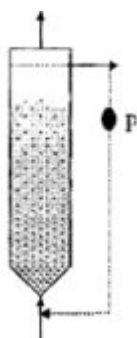


Figura 34 - Reator de leito fluidizado (Fonte: Silveira, 2009).

#### 4.3.6. Reator de manto de lamas de fluxo ascendente (UASB)

Os reatores UASB são a tecnologia utilizada com mais frequência para o tratamento de águas residuais domésticas e industriais.

Neste tipo de reator, o resíduo líquido apresenta fluxo ascendente através de um manto espesso de lama granular anaeróbia. A lama granular contém concentrações elevadas de bactérias imobilizadas que apresentam propriedades que propiciam a colonização. A biomassa encontra-se retida como um manto ou matriz granular. A formação dos grânulos anaeróbios é um processo complexo que pode ser desencadeado pela adsorção e adesão das bactérias a matéria inerte, precipitados inorgânicos e/ou ambos através de interações físico-químicas ou associações sintróficas. Estas substâncias servem como precursores iniciais para o crescimento bacteriano posterior. O elevado potencial de sedimentação dos grânulos de lama permite uma retenção superior de biomassa no interior do reator comparativamente aos outros sistemas de tratamento, possibilitando, conseqüentemente, que o sistema UASB atinja uma taxa de alimentação orgânica bastante elevada.

Este tipo de reatores possibilita que se atinjam concentrações elevadas de biomassa sem que sejam necessários materiais de suporte permitindo uma redução de custos significativa. O substrato entra no reator pela parte inferior, onde entra em contacto com

o leito de lamas sedimentadas. A parte superior do reator possui um sistema de separação de fases (sólido, líquido, gás), existindo no interior do reator uma zona específica separada para cada fase: uma zona de digestão, uma zona de sedimentação, e uma zona de separação gás/líquido. A mistura do conteúdo do reator é proporcionada pela produção de metano no interior do manto e pelo fluxo hidráulico (Silveira, 2009).

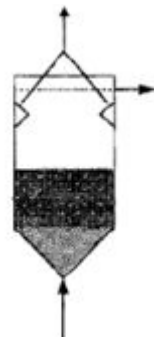


Figura 35 - Reator de manto de lamas de fluxo ascendente (UASB) (Fonte: Silveira, 2009).

#### 4.3.7. Reator anaeróbio com anteparas

Este tipo de reator consiste numa série de anteparas verticais alternadas por entre as quais ocorre o fluxo de água residual.

As principais vantagens associadas à utilização de reatores com anteparas são: a elevada estabilidade e fiabilidade devido a aderência dos sólidos no meio filtrante, acabando a biomassa por funcionar ela própria como um meio de suporte para a aderência dos microrganismos; a disposição das anteparas permitir reduzir a perda de biomassa pelo efluente, retendo um conteúdo elevado de sólidos; a configuração do reator com anteparas permitir que este recupere rapidamente de choques hidráulicos e de carga orgânica; não requer equipamento extra para separação do gás e da lama; permitir operar como um sistema de tratamento anaeróbio em duas fases devido a sua configuração compartimentalizada, com uma separação espacial da biomassa acidogénea e metanogénica; e reduzir a fração de espaços mortos comparativamente a de outros

sistemas; possibilitar o tratamento de praticamente todo o tipo de águas residuais orgânicas solúveis de baixa a elevada carga (Silveira, 2009).

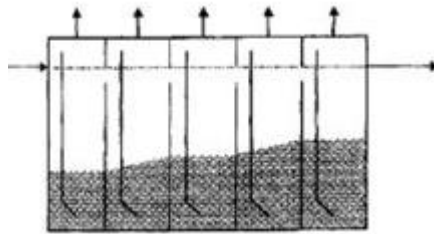


Figura 36 - Reator anaeróbio com anteparas (também designado reator fluxo-pistão) (Fonte: Silveira, 2009).

#### 4.3.8. Digestão anaeróbia em duas fases

A aplicação do processo de DA em duas fases implica a utilização de dois reatores separadamente, um para a fermentação e outro para a acetogénese/metanogénese. Estes reatores encontram-se dispostos em série, permitindo a otimização independente de cada fase do processo da digestão.

Os benefícios estão associados ao facto dos microrganismos acidogénicos e metanogénicos possuírem diferentes requisitos nutricionais, características fisiológicas, pH ótimo e cinética de crescimento. Com a separação de fases, as reações de hidrólise, fermentação e acidificação ocorrem no primeiro reator, enquanto as reações de acetogénese e metanogénese ocorrem predominantemente no segundo reator.

As principais vantagens da aplicação do processo de DA em duas fases são: maior controlo do processo; possibilidade de eliminação da biomassa acidogénea em excesso resultante do crescimento rápido e excessivo das bactérias fermentativas, evitando deste modo a inibição da metanogénese derivada da acumulação de produtos ácidos; e composição superior em metano no biogás. As principais desvantagens comparativamente aos outros sistemas de tratamento são: a disrupção das relações sintróficas, a elevada

acumulação de lamas no primeiro reator (acidogéneo), e uma operação mais complexa (Silveira, 2009).

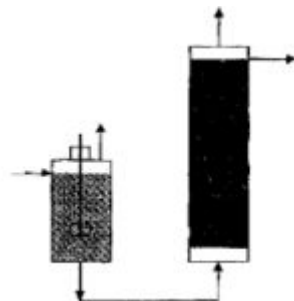


Figura 37 - DA em duas fases (Fonte: Silveira, 2009).

## Capítulo 5.

### REDES NEURONAIS ARTIFICIAIS

Neste capítulo faz-se uma descrição das RNA, que se inspiram nas Redes Neurais Biológicas para resolver problemas de predição. Apresenta-se um breve resumo desta área da ciência, ao longo das últimas décadas. Nesta sequência, é apresentado o modelo do neurónio biológico e artificial. Classificam-se as RNA quanto à arquitetura e quanto ao processo de aprendizagem. Descreve-se o funcionamento das RNA, onde se abordam as diferentes fases que as compõem, bem como os diferentes tipos de redes neurais existentes. Neste capítulo também se discutem algumas das razões que motivam o emprego de RNA.

#### 5.1. Evolução histórica

Em concordância com Matos (2008), em 1943 McCulloch e Pitts conceberam neurónios artificiais como modelos simplificados de neurónios biológicos, tendo deduzido que, com um número suficiente de unidades, pesos sinápticos corretamente ajustados e a operar em paralelo, esses modelos matemáticos teriam capacidade para aproximar qualquer função. No entanto, o modelo desenvolvido carecia da habilidade de aprender. Em 1949, surgiu o livro *A organização do comportamento*, onde Donald Hebb afirmou que a eficiência de uma sinapse variável entre dois neurónios é aumentada pela ativação repetida de um pelo outro através dessa sinapse. Este resultado, tendo constituído a primeira tentativa de apresentar uma regra explícita de modificação sináptica, foi bastante importante nos desenvolvimentos subsequentes das RNA.

Na sequência da crescente atividade científica em torno desta nova disciplina, Rosenblatt (1958) concebeu o *perceptrão*, um filtro linear com capacidade de adaptação

Tal como foi estabelecido no *teorema da convergência do perceptrão*, esta rede tinha a capacidade de encontrar sempre solução, num número de passos finito, desde que os dados correspondessem a um conjunto linearmente separável. Em 1960, Widrow e Hoff, desenvolveram um algoritmo de treino baseado no erro quadrático médio (EQM) que implementaram na Adaline (*Adaptative Linear Element*). Em 1962, foi proposta por Widrow a Madaline (Multiple-adaline), uma das primeiras redes neuronais com vários componentes adaptáveis que tinha a capacidade de aprender. Em 1963, a utilização de estruturas com vários elementos foi reforçada por Winograd e Cowan, que demonstraram em que medida um número elevado de elementos pode representar coletivamente um conceito único, com um aumento correspondente de robustez e paralelismo.

Na sequência destes sucessos, durante a década de sessenta, o progresso das RNA parecia nada menos que promissor e o seu campo de aplicação virtualmente ilimitado. No entanto, em 1969, Minsky e Papert demonstraram matematicamente que há limites fundamentais nas operações que *perceptrões* de camada única podem executar e declararam que não havia razões para assumir que qualquer desses limites pudesse vir a ser ultrapassado na versão multilinear. Para além disso, as redes multilineares tinham alguns problemas próprios, como o problema da atribuição de crédito, abordado por Minsky em 1961.

Assim, durante a década de 70, o estudo e desenvolvimento das RNA foi posto de lado por muitos investigadores e, não obstante a maior parte dos conceitos e ideias necessários para ultrapassar os problemas levantados na década de 60 já tivesse sido desenvolvida, as soluções tardaram em aparecer devido a dificuldades na experimentação e ao efeito desencorajador que teve a constatação de severas limitações nas redes neuronais, após um período de tão profícuo desenvolvimento.



No decorrer deste intervalo, vários trabalhos contribuíram para o avanço e, finalmente, o “renascer” das RNA. Destacam-se os mapas topológicos de von der Malsburg (1973), A ART (Adaptive resonance Theory) de Grossberg (1980), os mapas de Kohonen (1982), a máquina de Boltzmann, por Ackley, Hinton e Sejnowski (1985) e, especialmente, as redes de Hopfield (1980) que, embora não constituam modelos realistas dos sistemas neurobiológicos, vieram despertar implicações profundas na compreensão das RNA (Haykin, 1999). Por outro lado, a utilização de redes neuronais de camadas múltiplas (perceptrões multicamada ou PMC), implementando funções de ativação não lineares (por exemplo sigmóides ou logísticas, introduzidas em 1967 por Cohen), o modelo aditivo de Grossberg (1967/68) e Amari (1972) e, finalmente, o algoritmo de retropropagação, publicado em 1986 por Rumelhart, Hinton e Williams permitiu ultrapassar as limitações assinaladas por Minsky.

Apesar dos PMC serem, ainda hoje, a RNA mais utilizada devido à sua eficiência e conceção simples, a partir da década de oitenta grandes progressos têm sido feitos no campo da inteligência artificial e, em particular, das RNA. Em 1988 Broomhead e Lowe introduziram as RBR (Redes de base radial ou, em inglês, Radial Basis Functions), que constituem uma alternativa aos PMC e, no início dos anos noventa, Vapnik e diversos colaboradores inventaram as máquinas de apoio vetorial.

## 5.2. Neurónio Biológico

Matos (2008) refere que, o sistema nervoso é formado por um conjunto extremamente complexo de células, intituladas de neurónios. Composto por cerca de dez mil milhões de neurónios, cada neurónio pode estabelecer ligações sinápticas com cerca de dez mil outras células. Os neurónios têm um papel essencial na determinação do funcionamento e comportamento do corpo humano e do raciocínio.

De acordo com Härter (2004), o neurónio ou célula nervosa aparece em diferentes formas e tamanhos no cérebro humano, sendo composto por dendritos, axónio, sinapses e núcleo (soma ou corpo celular). A partir do corpo celular, centro dos processos metabólicos da célula nervosa, projetam-se extensões filamentosas, os dendritos e o axónio. Os dendritos muitas vezes cobrem um volume maior do que o corpo celular. O axónio ou fibra nervosa serve para conectar a célula nervosa a outras células do sistema nervoso. O neurónio possui geralmente um único axónio, embora possa apresentar algumas ramificações e em alguns casos, estendem-se por distâncias comparáveis às dimensões do organismo, podendo chegar a vários metros. Alguns tipos de neurónios possuem uma capa segmentada de mielina, que serve para acelerar a transmissão da informação pelo axónio. Os neurónios comunicam-se através de sinapses, que representam a região onde dois neurónios entram em contacto e através da qual os impulsos nervosos são transmitidos entre eles.

O mesmo autor refere ainda que a atividade do neurónio biológico é descrita por Kovacs (1996) como: as sinapses são regiões eletroquimicamente ativas, compreendidas entre duas membranas celulares: a membrana pré-sináptica, por onde chega o estímulo proveniente de outra célula, e a membrana pós-sináptica, que é a membrana do dendrito. Nesta região intersináptica, o estímulo nervoso que chega à sinapse é transferido à membrana dendritar através de substâncias conhecidas como neurotransmissores. O resultado desta transferência é uma alteração no potencial elétrico da membrana pós-sináptica. Dependendo do tipo do neurotransmissor, a conexão sináptica será excitatória ou inibitória. Uma conexão excitatória provoca uma alteração no potencial da membrana que contribui para a formação de um impulso nervoso no axónio de saída, contrariamente a uma conexão inibitória que age no sentido oposto.

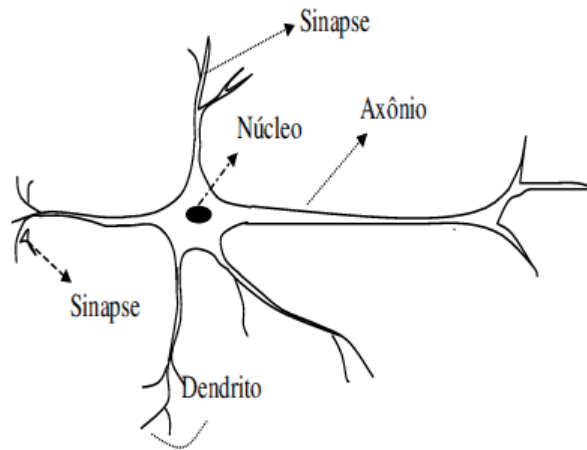


Figura 38 - Diagrama de um neurônio (Fonte: Härter, 2004).

### 5.3. Neurónio Artificial

De acordo com Härter (2007), um neurónio é uma unidade de processamento de informação fundamental para a operação de uma RNA.

O neurónio artificial é uma estrutura lógico-matemática que procura simular a forma, o comportamento e as funções de um neurónio biológico. Assim sendo, os dendritos foram substituídos por *entradas*, cujas ligações com o corpo celular artificial são realizadas através de elementos chamados de *peso* (simulando as sinapses). Os estímulos captados pelas entradas são processados pela *função de soma*, e o limiar de disparo do neurónio biológico foi substituído pela *função de transferência*.

Combinando diversos neurónios artificiais é possível formar o que se denomina de RNA. As entradas, simulando uma área de captação de estímulos, podem ser conectadas em muitos neurónios, resultando, assim, numa série de saídas, onde cada neurónio representa uma saída. Essas conexões, em comparação com o sistema biológico, representam o contato dos dendritos com outros neurónios, formando assim as sinapses. A função da conexão em si é tornar o sinal de saída de um neurónio num sinal de entrada de outro, ou ainda, orientar o sinal de saída para o mundo externo (mundo real). As

diferentes possibilidades de conexões entre as camadas de neurónios podem gerar  $n$  números de estruturas diferentes.

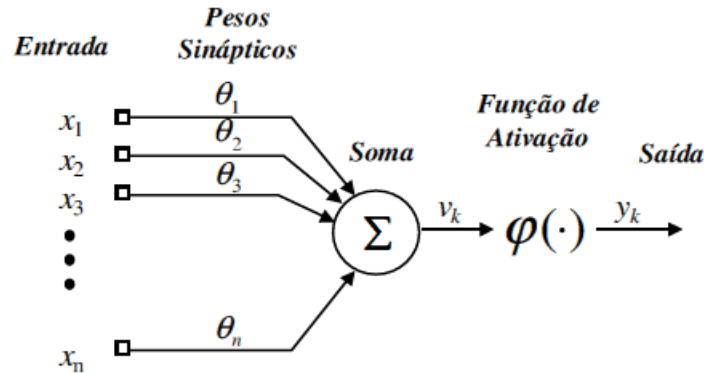


Figura 39 - Esquema de um neurónio artificial (Fonte: Härter, 2004).

## 5.4. RNA

Em concordância com Matos (2008), as RNA são técnicas computacionais que apresentam um modelo matemático inspirado na estrutura neuronal de organismos inteligentes e que adquirem conhecimento através da experiência. A relação de paralelismo entre as RNA e biológicas é uma valência importante para utilizadores das RNA.

Assim, as RNA retêm muitas características dos sistemas biológicos. Tal como nestes, o processamento de informação é conseguido através de múltiplas unidades básicas funcionando em paralelo, cada unidade recebe e efetua várias ligações, com as unidades de processamento a realizar apenas operações simples, armazenando o “conhecimento” na estrutura da própria rede e os processos de reforço e inibição do “peso” das ligações a obedecer a lógicas semelhantes.

### 5.4.1. Estrutura de uma RNA

De acordo com o manual do NeuralTools da Palisade (2013), a estrutura da RNA é composta por unidades conectadas referidas como “nós” ou “neurónios”. Cada neurónio efetua uma parte dos cálculos dentro da RNA: o neurónio usa alguns números como

*inputs*, efetua cálculos relativamente simples com os mesmos e retorna um *output*. O valor de *output* de um neurónio é então transmitido como um dos *inputs* para outro neurónio, exceto no caso dos neurónios que geram os valores de *output* finais de todo o sistema. Os neurónios são dispostos em camadas. Os neurónios da camada de *inputs* recebem os *inputs* para efetuar os cálculos. Esses valores são passados aos neurónios na primeira camada oculta, que efetuam os cálculos baseados nos *inputs* e passam os *outputs* para a próxima camada. A próxima camada pode ser outra camada oculta, se for o caso. Os *outputs* dos neurónios na última camada oculta são passados ao neurónio ou neurónios que geram os *outputs* finais da rede.

Como refere Matos (2008), o nó é a unidade base de uma RNA, como tal, é necessário conhece-lo para compreender o funcionamento da totalidade da rede. A figura seguinte sintetiza-se o funcionamento de um nó genérico em que *fi*, *fa*, e *fo* correspondem às funções de transformação que podem ocorrer no interior. O nó apresentado recebe ligações de três nós a montante e está ligado a três nós para jusante.

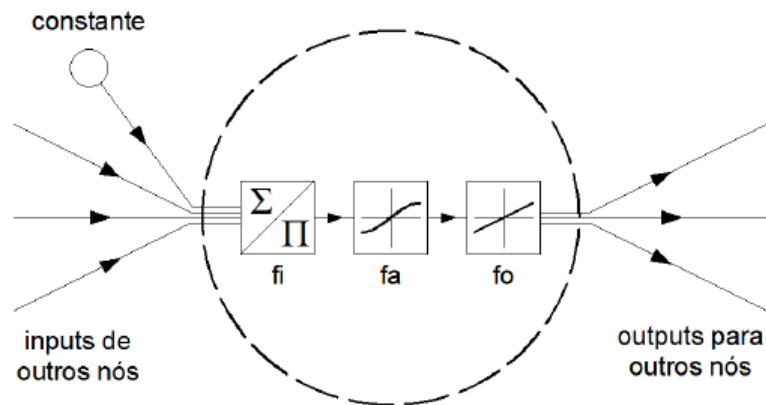


Figura 40 – Modelo de um nó de uma RNA (Fonte: Matos,2008).

As operações que se realizam dentro do nó de uma RNA podem ser três (Matos, 2008):

- Função de *input* (*fi*) – corresponde ao somatório dos *inputs* num único valor real mas outras conceções, também podem ser aplicadas (produto);

- Função de ativação (fa) – faz corresponder o resultado da função de *inputs* a um nível de ativação do nó, variando normalmente entre -1 e 1 ou entre 0 e 1;
- Função de *output* (fo) – aplica-se a função de output para produzir um sinal a partir do nível de ativação do nó. Na maioria dos casos esta função não é utilizada, pois o que é transmitido é simplesmente o nível de ativação.

#### 5.4.2. Arquitetura

A partir do modelo de um neurónio artificial pode construir-se uma RNA. A disposição dos neurónios nas camadas e o padrão de conexão entre estas definem a arquitetura da RNA.

De maneira geral, há dois tipos de arquitetura (Moreira,1997):

- As redes sem realimentação (*feedforward*) têm neurónios agrupados em camadas, o sinal percorre a rede numa única direção (com alimentação para a frente), da entrada para a saída, os neurónios da mesma camada não são conectados, isto é, começando a partir de qualquer unidade da rede e seguindo as direções das conexões sinápticas chega-se a uma das unidades de saída, e esta não está conectada a outra unidade da rede.
- As redes com realimentação ou recorrentes (*recurrent*), a saída de alguns neurónios alimentam neurónios da mesma camada (inclusive o próprio) ou de camadas anteriores, o sinal percorre a rede em duas direções, tem memória dinâmica, capacidade de representar estados em sistemas dinâmicos.

De acordo com Härter (2007), destaca-se ainda na arquitetura das RNA, os tipos de conexão entre os neurónios, ou seja, diz-se que a rede é totalmente conectada quando todas as saídas de uma camada estão conectadas com todos os neurónios da próxima camada. Na falta de alguma dessas conexões se diz que a rede é parcialmente conectada.

A definição da arquitetura de uma RNA é um parâmetro importante na sua conceção, uma vez que ela restringe o tipo de problema que pode ser tratado pela rede. RNA com uma única camada de nodos, por exemplo, só consegue resolver problemas linearmente separáveis. As redes multicamada são constituídas por diferentes camadas dispostas paralelamente.

#### 5.4.3. Aprendizagem (treino)

A propriedade mais importante das RNA é a capacidade de aprender e com isso melhorar seu desempenho, isto é feito através de um processo iterativo designado de treino. O treino consiste na modificação dos pesos das conexões entre os neurónios, os pesos iniciais (sinapses) são modificados de forma iterativa, por um algoritmo de treino. Algoritmo de treino é um conjunto de regras bem definidas para a solução de um problema de treino. Existem algoritmos de treino específicos para determinados modelos de RNA, estes algoritmos diferem entre si principalmente pelo modo como os pesos são modificados (Moreira, 1997).

O processo de aprendizagem de uma RNA pode ser realizado através de:

- Aprendizagem supervisionada (aprendizagem com supervisão), neste tipo de aprendizagem são conhecidas *a priori* as respostas corretas correspondentes a um certo conjunto de dados de entrada.
- Aprendizagem não supervisionada (aprendizagem sem supervisão ou auto-organização), este tipo de aprendizagem é realizada sem se conhecer antecipadamente as respostas consideradas corretas correspondentes a um certo conjunto de dados de entrada. Esta aprendizagem é aplicada em sistemas de memória associativa e de reconhecimento de padrões.

- Aprendizagem por reforço (aprendizagem por reforço), para cada entrada apresentada, é produzida uma indicação (reforço) sobre a adequação das saídas correspondentes produzidas pela rede.

#### 5.4.4. Modelos de RNA

##### 5.4.4.1. Perceptrão

Tal como evidenciado em Matos (2008), o perceptrão é a forma mais simples de RNA utilizada para a classificação de padrões considerados linearmente separáveis (padrões que residem em lados opostos de um hiperplano). Esta RNA, é constituída por um único nó com pesos sinápticos (ou ligações) e constantes ajustáveis. O esquema do nó utilizado por Rosenblatt foi o proposto por McCulloch e Pitts.

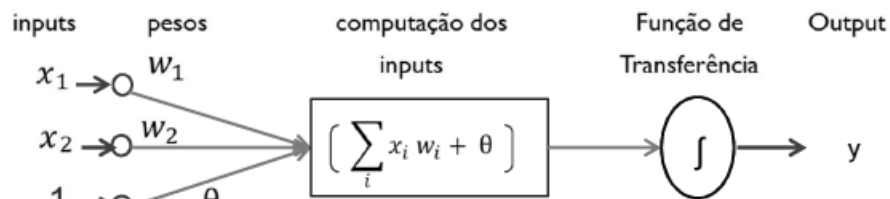


Figura 41 – Representação esquemática de um perceptrão (Fonte: Silva, 2013).

Devido às propriedades do perceptrão, o resultado fornecido pela rede, é binário, assumindo o valor +1 ou -1 consoante o valor do campo local induzido seja superior ou inferior a zero. O algoritmo de convergência desenvolvido para o perceptrão é do tipo supervisionado, ou seja, para efetuar o treino é necessário deter a classificação desejada para cada um dos vetores que fazem parte dos dados (Matos, 2008).

Pelo teorema da convergência do perceptrão, Rosenblatt estabeleceu que caso os padrões utilizados no treino do perceptrão pertençam a duas classes linearmente separáveis, o algoritmo do perceptrão converge e posiciona a superfície de decisão no hiperplano entre essas classes.



Mais tarde, provou-se que aumentando o número de nós, aumenta também o número de classes que o perceptrão permite separar. Mesmo tendo constituído uma importante inovação, o perceptrão apresenta limitações associadas ao comportamento linear, as limitações que Minsky e Pappert formalizaram em 1969. O perceptrão foi paradigmático e é interessante na introdução a redes mais complexas, em particular ao PMC que, como o nome indica, é nele inspirado.

#### 5.4.4.2. Perceptrão multicamada

Como refere Matos (2008), a retropropagação aplicada ao perceptrão multicamada (PMC), desenvolvida por Rumelhart (1986), veio resolver o problema da atribuição de crédito que descredibilizou as RNA nas décadas de setenta e oitenta. Um PMC é uma RNA do tipo *feed-forward*, constituída por uma camada de *input*, um número arbitrário de camadas ocultas e uma camada de *output*, organizadas sequencialmente, em que cada nó está ligado a todos os neurónios da camada seguinte.

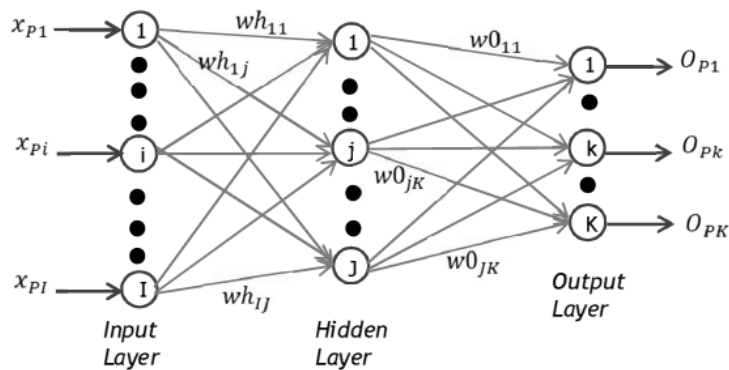


Figura 42 - Esquema PMC (Fonte: Silva, 2013).

Os PMC são úteis por constituírem aproximadores universais, tendo o potencial para aproximar qualquer função contínua com nível de erro abaixo de qualquer superior a 0, tal como é estabelecido pelo teorema do aproximador universal. Não obstante, a prática demonstra que tal resultado não é muitas vezes aplicável, uma vez que a quantidade de

nós e dados necessária para o atingir aumenta consideravelmente com a complexidade da função e a diminuição do erro. O PMC apresenta vantagens em relação a soluções de aproximação tradicionais (polinomiais ou trigonométricas), pois a degradação da qualidade da aproximação com o aumento de dimensões do problema é bastante menor.

A complexidade que os PMC podem adquirir é substancial e as operações que ocorrem no interior da rede complexas, pelo que o treino, deve seguir procedimentos que evitem, tanto quanto possível, problemas na solução final.

#### 5.4.5. Tipos de RNA

Há vários tipos de RNA, que se diferenciam pela estrutura, pelos tipos de cálculos efetuados dentro dos neurónios e pelos algoritmos de treino.

Existem fatores que determinam o comportamento da rede como sejam (Palisade, 2013):

- Topologia define o número de camadas ocultas e o número de nós das camadas;
- “Pesos” das conexões (um parâmetro atribuído a cada conexão) e termos de viés (um parâmetro atribuído a cada neurónio);
- Função de ativação/transferência usada para converter os *inputs* de cada neurónio no output correspondente.

As RNA têm capacidade de aprender as relações complexas existentes entre os dados. Por meio de uma imitação das funções do cérebro, as redes discernem padrões existentes nos dados e depois, quando são fornecidos novos dados, fazem extrapolações para gerar previsões.

Os tipos de problemas em que as RNA são empregues podem ser divididos em dois grupos gerais (Palisade,2013):

- Problemas de classificação: problemas em que se tenta determinar a que tipo de categoria pertence um item desconhecido. Exemplos: diagnósticos médicos e previsão da capacidade de pagamento de débitos.
- Problemas numéricos: situações em que é necessário prever um resultado numérico específico. Exemplos: previsão de preços de ações e previsão do nível de vendas durante um período futuro.

O NeuralTools da Palisade dispõe de três tipos de redes: Redes Multi-Layer Feedforward (MLF); Redes Neurais de Regressão Generalizada (GRNN) e Redes Neurais Probabilísticas (PN).

Com as redes MLF, é possível especificar se deve haver uma ou duas camadas de neurónios ocultos e quantos neurónios as camadas ocultas devem conter.

As redes GRNN e as redes PN interrelacionam-se estreitamente. As redes GRNN são usadas para previsão numérica/aproximação de funções, enquanto as redes PN são usadas para classificação/previsão de categorias. No caso das redes GRNN/PN, não é necessário tomar nenhuma decisão quanto à estrutura da rede, uma vez que estas redes sempre têm duas camadas ocultas de neurónios.

#### 5.4.5.1. Redes multi-layer feedforward

Em concordância com Palisade (2013), as Redes Multi-Layer Feedforward (também conhecidas como “Redes Multi-Layer Perceptron”/*Multi-Layer Feed-Forward Nets/Feed-Forward Nets/Perceptron Nets ou Perceptrão Multicamada (PMC)*) são sistemas capazes de efetuar aproximações de funções complexas, podendo modelar relações complexas entre variáveis independentes e uma variável dependente. Relativamente à arquitetura estas redes apresentam uma camada de entrada (*input*), uma camada de saída (*output*) e, pelo menos, uma camada intermédia ou oculta (*hidden layer*).

O treino de uma rede MLF consiste em encontrar um conjunto de pesos de conexão que façam com que a rede, de modo geral, forneça respostas corretas quando são apresentados novos casos. O treino é iniciado com a atribuição de um conjunto de pesos de conexão selecionado aleatoriamente. É feita uma previsão para cada caso de treino (usando valores independentes como *inputs* para obter o *output*). É muito provável que o *output* seja diferente do valor dependente conhecido. Assim, para cada caso de treino existe um valor de erro. A partir desses valores, calcula-se uma medida de erro para todo o conjunto de treino, que informa como foi o desempenho da rede com os pesos iniciais.

É provável que a rede não apresente muito bom desempenho com os pesos aleatórios inicialmente atribuídos, prosseguindo-se tentativas subsequentes com outras atribuições de pesos. Contudo, as novas atribuições de pesos não são aleatórias, são decididas pelo algoritmo de treino sendo o método de seleção dos pesos de conexão baseado nos resultados das tentativas anteriores. Deste modo, o objetivo é minimizar a medida de erro mudando os pesos de conexão. A medida de erro usada ao treinar redes de previsão numérica é o erro médio quadrático de todos os casos de treino, ou seja, a diferença média quadrática entre a resposta correta e a resposta dada pela rede. No caso da classificação, existe mais de um *output* para cada caso de treino (isto é, um *output* correspondente a cada categoria dependente). Calcula-se o erro médio quadrático com base em todos os *outputs* de todos os casos de treino, usando como referência os valores de *output* desejados: para cada caso de treino pretende-se que o valor do *output* seja próximo a 1, para o *output* correspondente à categoria correta, e tenciona-se que os restantes valores de output sejam próximos de 0.

Portanto, quanto mais longo o tempo de treino da rede, melhor o resultado. Quanto maior o número de vezes que a rede puder reiniciar, maior a probabilidade de que será encontrado o mínimo global da função de erro. A seleção do número de camadas e do

número de neurónios de cada camada define se a rede será capaz de apreender a relação entre as variáveis independentes e dependentes. Uma única camada oculta é suficiente para praticamente qualquer problema; o uso de duas camadas geralmente resulta no prolongamento desnecessário do tempo de treino. Além disso, normalmente um pequeno número de neurónios numa única camada oculta é suficiente.

#### 5.4.5.2. Redes neuronais de regressão generalizada (GRNN)

De acordo com Palisade (2013), as redes GRNN são estruturadas da seguinte forma: uma camada de *inputs*, duas camadas ocultas e uma camada de *output*. Na camada de input cada nó representa uma variável de entrada. A primeira camada oculta, designada camada padrão, contém um nó para cada caso de treino. A segunda camada oculta, designada camada de soma, contém nós de numeradores e denominadores e o seu tamanho depende de diversos fatores relacionados com os dados de treino. Cada neurónio da camada de padrões calcula a sua distância em relação ao caso apresentado. Os valores passados aos nós de numeradores e denominadores são funções da distância e do valor dependente. Os nós da camada de soma efetuam a soma de seus *inputs*, enquanto o nó de output os divide para gerar a previsão.

Quando um caso é apresentado à rede, esta calcula o valor dependente previsto usando os valores dependentes de cada caso de treino, sendo que os casos de treino mais próximos contribuem de forma mais significativa ao valor do *output*. Quanto mais próximo um caso conhecido está de um desconhecido, mais peso é dado ao estimar o valor dependente desconhecido. As GRNN baseiam-se nesses conceitos intuitivos.

A função de distância calculada nos neurónios da camada de padrões usa “fatores de suavização”, tendo cada *input* o seu próprio valor de “fator de suavização”.

O treino de uma rede GRNN consiste em otimizar os fatores de suavização para minimizar o erro no conjunto de treino. A medida de erro usada durante o treino para avaliar diferentes conjuntos de fatores de suavização é o erro médio quadrático.

#### 5.4.5.3. Redes Neurais Probabilísticas (PN)

Tal como menciona Palisade (2013), quando um caso é apresentado à rede, cada nó da camada de padrões calcula a distância entre o caso do treino representado pelo nó e o caso do *input*. O valor passado aos nós da camada de soma depende da distância e dos fatores de suavização. Assim como nas redes GRNN, cada *input* tem o seu próprio fator de suavização e esses fatores determinam a rapidez com que a significância dos casos de treino diminui com a distância. Na camada de soma há um nó para cada categoria dependente, cada nó perfaz a soma dos valores de output dos nós correspondentes aos casos de treino da categoria em questão. Os valores de *output* dos nós da camada de soma podem ser interpretados como estimativas da função de densidade de probabilidade para cada classe. O nó de *output* seleciona a categoria com o maior valor na função de densidade de probabilidade como a categoria prevista.

Da mesma forma que com as redes GRNN, o treino de uma rede PN consiste em otimizar os fatores de suavização para minimizar o erro no conjunto de treino. A medida de erro usada durante o treino para avaliar diversos conjuntos de fatores de suavização é calculada com base em todos os valores retornados pelos nós da camada de soma de todos os casos de treino. A medida tem em atenção não apenas a probabilidade atribuída à categoria correta, mas também a distribuição de probabilidades atribuídas a categorias incorretas (é melhor ter uma distribuição aproximadamente uniforme de probabilidades nas categorias incorretas do que ter determinada categoria incorreta com alta probabilidade).

#### 5.4.6. Comparação entre redes MLF e PN/GRN

Cada tipo de RNA apresenta vantagens e desvantagens.

Vantagens das redes GRNN/PN (Palisade, 2013):

- Treino rápido;
- Não requerem especificação da topologia (número de camadas ocultas e nós);
- Além de efetuar classificação, as redes PN retornam as probabilidades de o caso se enquadrar em diferentes categorias dependentes.

Vantagens das redes MLF:

- São menores, portanto as previsões são mais rápidas;
- São mais confiáveis fora dos intervalos dos dados de treino (por exemplo, quando o valor de uma variável independente não pertence à gama de valores usados nos dados de treino). Contudo a previsão com redes MLF fora do intervalo dos dados de treino é arriscada.
- São capazes de fazer generalizações a partir de conjuntos de treino muito pequenos.

### 5.5. Fases de resolução dos problemas de predição com recurso a RNA

A implementação de uma RNA compreende quatro fases distintas: preparação dos dados, treino da rede, teste e previsão.

#### 5.5.1. Preparação dos dados

Como refere Matos (2008), a seleção e o tratamento de informação são a base de qualquer aplicação de redes neuronais, o processo de preparação dos dados é crucial para o sucesso da aplicação.

Assim, numa primeira fase da metodologia prevê-se uma análise criteriosa dos dados disponíveis, identificando-se claramente quais os objetivos a alcançar. Em função dos dados disponíveis e dos objetivos traçados, deverá ser examinada a adequação e aplicabilidade das RNA ao problema.

Uma vez escolhidas as variáveis, é boa prática preparar os dados utilizados no treino das redes para que o treino da RNA seja mais eficiente. Uma etapa em que se sintetizem as variáveis a partir de conhecimentos já adquiridos, tornando mais explícita a informação que contêm é, quando possível, bastante produtiva. Outras operações podem ser aplicadas com sucesso, tais como a adimensionalização, a logaritmização ou a utilização de médias móveis. O mesmo autor, menciona que a filtração do ruído da amostra e normalização dos dados (geométrica ou logarítmica) são medidas que beneficiam a qualidade final da RNA, não devendo ser esquecidas.

Paralelamente à seleção das variáveis mais importantes para a caracterização do fenómeno deve-se ter em conta que a quantidade de dados disponíveis é um fator muito importante para o sucesso de uma RNA. Normalmente, quanto maior for a quantidade de casos melhor será o treino da rede ou, pelo menos, com um maior número de casos será mais fácil para a rede perceber as relações existentes entre os dados. Com um número insuficiente de exemplos, tanto o desempenho da rede como a sua capacidade de generalização serão pobres. No entanto, não importa apenas a quantidade de dados, a qualidade dos mesmos também tem de ser garantida.

### **5.5.2. Treino RNA**

De acordo com Silva (2013), após definir um conjunto de dados que contenha casos com valores históricos conhecidos, procede-se ao treino de uma RNA usando esses dados. Há diversas opções para estabelecer o tipo de rede que será gerada. Dependendo do tipo de



dados, diferentes opções geram redes treinadas com melhor desempenho (ou seja, redes que fazem melhores previsões).

O treino é o processo de aprendizagem que permite afinar os parâmetros de computação da rede. O objetivo é fazer com que a RNA retorne valores aproximadamente corretos face a dados *inputs*. O processo é orientado pelos dados fornecidos para treino e pelo algoritmo de treino. Este último seleciona vários conjuntos de parâmetros e avalia cada um aplicando a RNA a cada caso de treino (uma linha da informação) e vendo quão boas são as respostas da rede. Cada conjunto de parâmetros designa-se por “trial” (tentativa). O algoritmo escolhe novos conjuntos de parâmetros face aos resultados de anteriores tentativas. Não são disponibilizados todos os dados conhecidos para o processo de treino da rede, guardando-se parte para o teste e, se necessário, para a validação.

### 5.5.3. Teste RNA

Durante a fase de teste, a RNA treinada é usada para verificar o seu desempenho, ou seja, a qualidade da previsão de valores de output conhecidos. Geralmente, os dados usados no teste são um subconjunto de dados históricos com valores de output conhecidos. Esse subconjunto não é usado no treino da rede. Após o teste, o desempenho da rede é medido estatisticamente para verificar, por exemplo, a percentagem de respostas conhecidas que foram previstas corretamente. Também é determinado o erro médio quadrático com base no qual é escolhida a melhor rede, sendo assim, a rede que apresentar menor erro médio quadrático na fase de teste é considerada a rede com maior garantia de sucesso na previsão de novos valores desconhecidos (Palisade, 2013).

### 5.5.4. Previsão

Em conformidade com a Palisade (2013), o objetivo de usar uma RNA é fazer previsões, isto é, prever valores de output desconhecidos. Depois de treinada e testada, a rede adquiriu capacidade de generalização, por isso, pode ser usada para prever valores de novos casos com um determinado grau de confiança.

O processo de treino e teste são iterativos e, por vezes, longos. Normalmente, o treino pode ser efetuado várias vezes, com configurações diferentes, até gerar uma RNA que apresente os melhores resultados ao ser testada. Depois de se obter a melhor rede, esta pode ser usada para efetuar previsões rapidamente.

### 5.6. Razões da aplicação das RNA

De acordo com Matos (2008), as RNA têm vindo a ser desenvolvidas e aplicadas nos mais diversos campos, incluindo: no setor económico-financeiro nas previsões no mercado de ações, atribuição de grau de risco para empréstimos e crédito, deteção de fraude de crédito, previsão de vendas, previsão de negócios em geral, risco de investimentos, na medicina em diagnósticos médicos, pesquisas científicas e sistemas de controlo, na ciência em processamento de linguagem e imagens, reconhecimento de padrões, classificação de dados, aproximação de funções, otimização, predição, planeamento, monitorização, diagnóstico e controlo. Também na área da engenharia e ambiente, as RNA têm sido utilizadas na previsão de hidrogramas de cheia, na modelação da qualidade da água e modelação da degradação estrutural de sistemas de distribuição de água.

As razões da crescente utilização das RNA em todos estes campos prende-se com os propriedades e capacidades que lhes estão associados (Matos, 2008):

- Aprendizagem – uma RNA pode ser iniciada “sem conhecimento” e treinada com um dado conjunto de exemplos (*inputs* e *outputs*, no caso de treino supervisionado

ou apenas *inputs*, no caso de treino não supervisionado); através do treino, as intensidades das ligações entre neurónios alteram-se de tal forma que a rede aprende a produzir o resultado desejado para os dados introduzidos;

- Generalização – capacidade da rede aprender através de um conjunto relativamente reduzido de exemplos e posteriormente dar respostas coerentes para dados não conhecidos,
- Paralelismo massivo potencial - no decurso do processamento da informação, vários neurónios “disparam” simultaneamente;
- Robustez – se alguns neurónios “falharem”, o sistema pode ainda ter um bom desempenho;
- Correspondência parcial – na maior parte dos casos uma correspondência total não é necessária.

Outra característica importante é a capacidade de auto-organização e de processamento temporal que faz das RNA uma ferramenta computacional extremamente poderosa e atrativa para a solução de problemas complexos. Estes benefícios permitem que as RNA consigam encontrar boas soluções mesmo com dados sujeitos a ruídos, falhas, informações imprecisas ou corrompidas.

Como refere Rocha (2013), o interior de um digestor anaeróbio funciona como uma “caixa negra” da qual não se consegue obter informação, em tempo real, que permita a monitorização e controlo do processo de digestão. Atualmente, o controlo do processo é efetuado apenas com base na experiência adquirida no passado e nos conceitos teóricos do processo anaeróbio conhecidos. O resultado de qualquer opção ou decisão não é conhecido no imediato, tornando complexa a monitorização do processo.

A aplicação de modelos matemáticos, como as RNA, a esta problemática da DA, pode ser um contributo para a compreensão do processo de digestão e otimização da

produção de biogás, constituindo ainda um sistema de apoio à decisão na gestão do processo anaeróbio.

## Capítulo 6.

### CASO EM ESTUDO

Ao longo deste capítulo será feita a descrição das diferentes fases que compuseram o trabalho desenvolvido, bem como algumas dificuldades que lhe estiveram associadas.

#### 6.1. Enquadramento

A otimização da produção de biogás, no processo de DA de ETAR, é um processo essencial para a rentabilidade de exploração de ETAR. Neste sentido, o Eng.º Gabriel Silva, orientador do presente trabalho, propôs a outras empresas do grupo AdP, que com os estagiários estudassem e explorassem este tema.

A proposta foi bem aceite, de tal forma que ao longo do estágio realizaram-se três sessões de trabalho na empresa AdP (Edifício Sede), nas quais estiveram presentes os estagiários, os professores e os orientadores dos estágios de Mestrado das seguintes empresas: AdP - Águas de Portugal (Direção de Engenharia); AdC - Águas da Covilhã; AdNW - Águas do Noroeste; IST - Instituto Superior Técnico; SANEST – Saneamento da Costa do Estoril, S.A.; SIMARSUL – Sistema Integrado Multimunicipal de Águas Residuais da Península de Setúbal, S.A.; SIMRIA – Saneamento Integrado dos Municípios da Ria, S.A.; SIMTEJO – Saneamento Integrado dos Municípios do Tejo e Trancão, S.A.; UM – Universidade do Minho; UNL – Universidade Nova de Lisboa e IST – Instituto Superior Técnico.

Na primeira sessão de trabalho, o Eng.º Gabriel Silva, fez a apresentação e introdução dos conceitos base das RNA do NeuralTools, recorrendo a alguns exemplos práticos que acompanham o programa. Propôs aos estagiários e orientadores, que cada um

analisasse o presente tema de trabalho utilizando diferentes ferramentas informáticas existentes no mercado (tais como: RNA ou Matlab).

Estas sessões de trabalho tinham como propósitos: explorar o tema da DA, identificar vantagens e desvantagens de utilizar diferentes programas na otimização da produção de biogás, trocar experiências e opiniões entre estagiários e orientadores e expressar as dificuldades sentidas na concretização dos trabalhos.

Relativamente à ferramenta informática utilizada no presente trabalho, NeuralTools da Palisade, importa referir que, no contexto do estágio, a SIMRIA adquiriu, uma versão para estudante do programa . O recurso ao NeuralTools<sup>TM</sup>, um dos aplicativos do pacote Decision Tools Suite<sup>TM</sup> da Palisade (que inclui também uma ferramenta de otimização baseada em algoritmos genéticos - o Evolver<sup>TM</sup>) foi decidida em conjunto com o orientador, devido às características que as RNA apresentam e que foram descritas no capítulo 5 do presente trabalho, e à aplicação deste tipo de ferramentas em casos de estudo na área do saneamento.

#### **6.1.1. 1ª Fase – Preparação dos dados**

O trabalho iniciou-se com a aprendizagem do funcionamento do programa NeuralTools da Palisade.

O NeuralTools trabalha sobre folhas de cálculo do Excel, permitindo estruturar os dados por casos e variáveis. As variáveis estão dispostas em colunas, com o nome das mesmas na primeira linha do conjunto de dados. Cada linha do conjunto de dados é um caso e cada caso contém um conjunto de valores de variáveis independentes e um valor conhecido ou ausente para a variável dependente do *output*.

O NeuralTools disponibiliza o Gestor do Conjunto de Dados, para preparação dos dados, através deste, é possível editar ou excluir variáveis que podem ser usadas para o

treino, teste e previsão de RNA, adicionar ou remover conjuntos de dados e ainda identificar o tipo de variável no conjunto de dados.

As opções disponíveis no gestor do conjunto de dados para definir o tipo de variável são (Rocha,2013):

- Categórica dependente - é uma variável dependente ou de *output* cujos valores possíveis são tomados de um conjunto de possíveis categorias.
- Categórica independente - é uma variável independente cujos valores possíveis são tomados de um conjunto de possíveis categorias.
- Numérica dependente - é uma variável dependente ou de *output* cujos valores possíveis são numéricos.
- Numérica independente - é uma variável independente cujos valores possíveis são numéricos.
- Tag - é uma variável que assume possíveis valores de treino, teste ou previsão. Este tipo de variável é escolhido pelo utilizador para identificar casos a serem usados especificamente para treino, teste e previsão.
- Não usada - é uma variável que não será usada na RNA.

### **6.1.2. 2ª Fase – Recolha de dados**

Conforme mencionado no capítulo 3 do presente relatório, no processo de operação da ETAR existem elementos de controlo para aquisição de dados, através de um plano de amostragem, relacionados com o funcionamento da ETAR.

A ETAR Norte, no âmbito da empreitada, foi explorada pelo consórcio RRC/FCC/Dragados/Sopol (Grupo Espanhol) até Maio de 2005. A partir dessa altura, a SIMRIA assumiu a exploração direta da ETAR. Durante este tempo os dados eram arquivados em formato papel. Em 2011, a SIMRIA implementou o software, NAVIA

(Software de Gestão Operacional de Infraestruturas), que permitiu o armazenamento destes dados recolhidos ao longo do tempo, criando, assim, uma base de dados.

Existem diferentes tipos de dados recolhidos e com periodicidades diferentes. Alguns dados são recolhidos *in loco*, outros são obtidos através de análises laboratoriais às amostras de efluente e lamas recolhidas pelos operadores. Os resultados dessas análises são carregados no mesmo programa. Este software permite consultar o histórico dos dados recolhidos desde 2011.

Conforme Matos (2008), uma aplicação bem-sucedida de um modelo de RNA requer uma preparação adequada dos dados de *input*, assim como, uma sólida compreensão do processo a ser modelado é essencial para a correta seleção das variáveis de entrada.

Neste sentido, nas primeiras semanas de estágio, procurou-se compreender o modo de funcionamento da ETAR Norte e DA a que está sujeito o tratamento das lamas com posterior produção de biogás.

Com o apoio do co-orientador, e da experiência que detinha do trabalho do Rocha (2013) na ETAR Sul, foi definido um conjunto de variáveis representativas do funcionamento do processo de digestão. A base de dados executada para o presente trabalho na ETAR Norte, continha variáveis: pH, MS, MV e MV/MS nos espessadores de lamas (I e II) e pH, MS, MV, MV/MS, AGV, alcalinidade, AVG/Alcalinidade, caudal lama enviado ao digestor, TRH, temperatura entrada das lamas, CMV nos digestores (I e II) e volume de biogás produzido nos digestores (I e II), esta base de dados encontra-se disponível no Anexo I.

No capítulo 4 do presente trabalho, são mencionadas as características e a importância de algumas destas variáveis para o processo de DA, como: pH, AGV,



alcalinidade, TRH e temperatura. As características das restantes são referidas em seguida (Rocha, 2013):

- MS (%) – representa a percentagem de matéria sólida presente nas lamas.
- MV (%) – representa o conteúdo em matéria orgânica da lama. Fração passível de ser digerida.
- MV/MS – permite verificar qual o potencial do resíduo para a digestão.
- AGV/Alcalinidade – conforme mencionado anteriormente os AGV provocam a diminuição da alcalinidade, por isso, o quociente entre os valores de AGV e a alcalinidade é importante para monitorizar o processo, não devendo ser superior a 0,2.
- Caudal lama enviado ao digestor – representa o volume de lamas que entram no digestor ao longo de um dia. Está dependente da quantidade e características de efluente que é encaminhado para a ETAR.
- Carga Mássica Volúmica (CMV) – a CMV é um parâmetro fundamental para a monitorização do processo de DA e relaciona a quantidade de matéria orgânica alimentada enviada ao digestor num dia com o volume do digestor.
- Volume biogás produzido nos digestores – este parâmetro representa o volume diário de biogás que é produzido pela DA.

Como o objetivo da modelação do processo de DA através de RNA é a otimização da produção de biogás, o volume biogás produzido nos digestores foi definido como *output* das RNA e as restantes variáveis representam os *inputs*.

Além do impacto destas variáveis no processo de DA, na definição das variáveis (*inputs*) e dados a recolher para o treino das RNA, devem ainda ser considerados outros critérios importantes como a disponibilidade e fiabilidade dos dados.

Após selecionadas as variáveis, procedeu-se à escolha do intervalo de tempo, por questões de acessibilidade aos dados (NAVIA) optou-se por um intervalo de tempo de Janeiro de 2011 a Agosto de 2013.

### 6.1.3. 3ª Fase – Tratamento de dados

A seleção e o tratamento de informação de informação são a base de qualquer aplicação de RNA.

Terminada a recolha de dados procedeu-se ao tratamento dos mesmos, através de uma análise criteriosa de dados. Esta análise consistia em, através de observação direta de gráficos construídos para cada uma das variáveis no intervalo de tempo mencionado, identificar possíveis *outliers* (valor atípico que apresenta um grande afastamento dos demais da série). Estes valores atípicos perturbariam o treino e teste das RNA e por isso necessitavam de ser retirados.

Devido às características que cada variável possui e por serem as variáveis, à partida, com maior peso (de acordo as melhores redes obtidas em Rocha (2013)), foi feita uma análise mais detalhada das variáveis MV (%), caudal lama enviado ao digestor, temperatura entrada das lamas e volume de biogás produzido no digestor I. Após identificação dos *outliers* nestas variáveis procedeu-se à retirada dos mesmos de cada uma das variáveis e procurou-se conjugar as datas de cada uma das variáveis sem *outliers* com as restantes. No final obtiveram-se cerca de 30 valores que eram insuficientes para treinar as RNA.

A qualidade dos dados disponíveis é um fator importante para o sucesso do treino das RNA, no entanto também a quantidade de dados influencia o desempenho da rede e a sua capacidade de generalização. Portanto, quanto maior for a base de dados, melhor será

o treino e a capacidade de previsão da rede ou, pelo menos, espera-se que, com um maior número de casos, seja mais fácil para a rede perceber as relações existentes entre os dados.

Durante o processo de identificação de *outliers* verificou-se que a variável condicionante era a MV (%), cujo número de amostras retiradas por semana para controlo do processo na ETAR é suficiente, mas é diminuto para trabalhar em RNA. Isto é, devido à sua importância e impacto no processo de DA sabe-se que a MV (%) é um parâmetro condicionante. Assim e devido à ausência de dados suficientes para o trabalho, aumentou-se o intervalo de tempo em um ano, passando assim a ser de Janeiro 2010 a Agosto de 2013. A razão pela qual não se escolherem os meses seguintes de 2013 deveu-se ao facto de existirem poucos dados nesses meses, resultantes de avarias no autómato e que não permitiram o registo de dados.

O passo seguinte foi procurar os registos diários, que se encontravam em formato papel, do ano de 2010 das variáveis: MV (%), caudal lama enviado ao digestor, temperatura entrada das lamas e volume de biogás produzido no digestor I. Este passo, obrigou a um dispêndio de tempo elevado.

De acordo com o que foi mencionado no presente trabalho, diariamente são feitos registos de valores de vários parâmetros que necessitam de ser controlados, estes registos são feitos pelos operadores da ETAR nos três turnos, nos horários da 00h00, das 08h00 e das 16h00. Quando se iniciou a procura dos dados destas variáveis quer no NAVIA, quer nos registos em papel, decidiu-se retirar os valores de cada dia à 00h00, por ser a hora que apresentava maior número de registos no maior número de variáveis. Neste caso, não se fizeram médias dos valores dos três turnos por não se verificarem melhorias nos resultados obtidos.

Uma vez identificado o problema base (escassez de valores da MV (%) no espessador), analisou-se esta variável com maior cuidado, identificaram-se as variações

anormais mais significativas e eliminaram-se desta variável. Em seguida, procedeu-se à compatibilização das datas da variável MV (%) com as variáveis caudal lama enviado ao digestor, temperatura entrada das lamas e volume de biogás produzido no digestor I.

No final desta análise, concluiu-se que dos 148 registos existentes de MV (%), para o período de tempo em estudo, apenas 123 eram válidos para treinar RNA. No Anexo II apresentam-se os gráficos finais representando a variação de cada variável ao longo do período de tempo considerado.

#### 6.1.3.1. Dificuldades no tratamento de dados

- Escassez de valores para a variável MV (%), devido ao diminuto número de amostras retiradas por semana para controlo do processo, obrigando ao alargamento do intervalo de tempo (um ano para trás);
- Até julho de 2011 os permutadores estavam trocados, isto é, o permutador 2 - digestor I e o permutador 1 - digestor II;
- Durante a análise aos *outliers* verificaram-se valores que não apresentavam coerência comparativamente aos dias anteriores e sucessivos, devido provavelmente a erros de registo dos operadores ou a erros de amostragem;
- Dificuldade em tornar compatíveis as datas em todas as variáveis após identificar e retirar os *outliers* de cada uma delas;
- A existência de avarias no autómato e no sinóptico obrigou a descartar valores que seriam importantes para treinar a RNA;
- Ao eliminar os *outliers* da MV (%) nas variáveis caudal lama enviado ao digestor, temperatura entrada das lamas e volume de biogás produzido no digestor I, podem ter sido eliminados valores que seriam válidos, não se sabendo se esta terá sido a melhor alternativa.

#### 6.1.4. 4ª Fase – Correções

Numa das sessões de trabalho na sede da AdP, conclui-se que só seria possível fazer comparações entre as diferentes ferramentas informáticas utilizadas nos trabalhos, caso se estabelecessem alguns pontos de igualdade.

Tal como mencionado anteriormente, outra variável que é parametrizada ao longo do dia é a temperatura, neste caso compreendeu-se ser importante usar a média das variações desta variável ao longo do dia no digestor. Corrigiu-se este ponto no presente trabalho, passando a usar-se a média das temperaturas no digestor I da ETAR Norte, desde janeiro de 2010 a agosto de 2013.

Durante a execução dos trabalhos, os estagiários depararam-se com a mesma dificuldade: escassos dados da variável MV (%) no espessador. De modo a ultrapassar esta dificuldade, que impedia a existência de um conjunto de dados satisfatório, foi proposto que se reavaliasse a análise feita aos *outliers* eliminados da variável MV (%). A nova análise foi feita tendo por base as características da linha de lamas, bem como a variação da variável MV (%) no espessador I, comparativamente a dias anteriores e dias sucessivos (Anexo III). Dessa nova análise resultaram 15 novos dados, dos quais 9 não podem ser considerados devido a avarias no autómato (o autómato queimou e não esteve em funcionamento entre 9 de dezembro de 2012 a 31 janeiro 2013), que não permitiram o registo de dados nas variáveis temperatura entrada das lamas e volume de biogás produzido no digestor I.

No final foi possível considerar mais 6 dados, e portanto o número de dados final para introdução nas RNA é de 129 valores. O Anexo III contém os gráficos finais das variáveis: MV (%), caudal lama enviado ao digestor, temperatura entrada das lamas e volume de biogás produzido no digestor I.

### 6.1.5. 5ª Fase – Treino e teste de RNA

O processo de treino e teste é iterativo e, às vezes, longo. Normalmente, o treino pode ser feito várias vezes, com configurações diferentes, até gerar a RNA que apresente os melhores resultados ao ser testada. Depois de obter a “melhor rede”, esta pode rapidamente ser usada para efetuar previsões (Palisade,2013).

#### 6.1.5.1. Treino de RNA

Em concordância com Palisade (2013), há diversas opções para estabelecer o tipo de rede, dependendo do tipo de dados, diferentes opções geram RNA com melhor desempenho (ou seja, RNA que fazem melhores previsões). O NeuralTools permite treinar e testar uma RNA e, em seguida, prever os valores de *output* – tudo numa única etapa. Mas também é possível reter uma determinada percentagem de dados históricos para o teste e depois selecionar a previsão automática de valores de *output*, para os casos em que os valores dependentes estão em falta.

De acordo com o que foi mencionado no capítulo 5, o NeuralTools permite usar diferentes configurações de RNA, a fim de propiciar as melhores previsões possíveis. Para a previsão de classificação/categoria (em que a variável dependente é um tipo de categoria) há dois tipos de redes disponíveis: redes PNN e redes MLF. A previsão numérica pode ser realizada usando-se redes MLF assim como GRNN, que são estreitamente relacionadas às redes PNN.

O NeuralTools permite ainda a seleção da configuração de rede com o recurso de busca da melhor rede. Quando essa opção é selecionada, são treinadas e testadas uma variedade de configurações de RNA até gerar a que produz as melhores previsões. A melhor configuração é determinada com base nos dados obtidos por meio do teste.

O treino é interrompido quando é alcançado um dos critérios de paragem, como, por exemplo, a duração máxima do treino, o número de iterações que se deve executar durante a fase de treino ou a variação do erro. Durante o treino da RNA, o programa informa o andamento do mesmo mostrando gráficos que são atualizados. Normalmente, a RNA melhora à medida que o treino continua, pois são geradas redes que fazem melhores previsões com menos erros. O Anexo IV contém as caixas de diálogo que o NeuralTools apresenta.

#### 6.1.5.2. Teste de RNA

Após a fase de treino segue-se a fase de teste, a RNA treinada é usada para verificar a qualidade da previsão de valores de *output* conhecidos. Geralmente, os dados usados no teste são um subconjunto de dados históricos com valores de *output* conhecidos. Esse subconjunto não é usado no treino da RNA. Quando os dados do teste se encontram num conjunto de dados separado, o NeuralTools faz a correspondência das variáveis do conjunto de dados do teste e dos dados de treino. O NeuralTools informa qual foi a qualidade da previsão de respostas conhecidas nos dados do teste. Isto ajuda a saber se a rede fará boas previsões quando aplicada a casos com valores de *output* desconhecidos (Palisade,2013).

Após definir o conjunto de dados que continha casos com valores históricos conhecidos, procedeu-se ao treino de RNA usando esses dados.

Contudo, antes de se iniciar a fase de treino foram consideradas algumas limitações das RNA. No conjunto de variáveis *input* não se devem apresentar variáveis que estejam diretamente relacionadas, que partilhem algum dos parâmetros que as definem e por isso variem da mesma forma ou sejam inversamente proporcionais, como é o caso do caudal

lama enviado ao digestor e o TRH. Estas variáveis são inversamente proporcionais, isto é, o TRH varia em função do caudal. A colocação destas duas variáveis no mesmo conjunto de dados pode conduzir a RNA a assumir esta relação como muito relevante e atribuir-lhes maior importância do que às restantes variáveis, desvirtuando o resultado final.

No caso em estudo, e utilizando a base de dados relativa ao digestor I, executam-se RNA com treino e teste em simultâneo. Assim, dividiu-se esta fase em quatro etapas, isto é, fizeram-se quatro conjuntos de RNA com conjugações de diferentes variáveis.

O primeiro conjunto de RNA possuía as mesmas variáveis que originaram as melhores RNA na ETAR Sul, variáveis independentes (*inputs*): MV (%), caudal lama enviado ao digestor, temperatura entrada das lamas, pH, AGV e a variável dependente (*output*): volume de biogás produzido no digestor I. Com o primeiro conjunto de RNA treinadas fez-se uma previsão inicial de forma a perceber a capacidade de previsão destas. Analisaram-se as RNA e identificou-se a que apresentava menor valor de erro médio quadrático no treino. Em seguida, foi proposto utilizar essa RNA para fazer previsão de valores de biogás para o ano de 2014, a finalidade era comparar os valores obtidos da RNA com valores reais de 2014.

Durante a procura de valores reais de volume de biogás produzido no digestor I para o ano de 2014, detetaram-se duas dificuldades:

- detetou-se que, no ano de 2014, não houve registos no NAVIA de produção de biogás, devido a avaria do caudalímetro. A solução encontrada para solucionar esta questão foi considerar que o volume de biogás produzido no digestor I se igualava ao volume de biogás consumido nos motogeradores, na tocha e nas caldeiras. No entanto, esta solução apresentava volumes de biogás produzidos altos (isto porque os aparelhos de medição de biogás são muito sensíveis a qualquer variação), que quando comparados com as previsões feitas pelas RNA



de produção de biogás, demonstravam que não havia coerência e que as RNA não estavam a fazer previsão corretamente.

- averiguou-se que a variável AGV utilizada na RNA foi substituída, usando-se atualmente um equipamento (FOS/TAC) que oferece um índice. FOS/TAC é um equipamento que através de titulação determina o quociente entre os ácidos gordos voláteis e a alcalinidade. FOS representa Flüchtige Organische Säuren, ou seja, ácidos gordos voláteis, enquanto TAC representa Totales Anorganisches Carbonat, isto é, alcalinidade (capacidade tampão). Até 11 de Março de 2013 era utilizado o quociente entre as variáveis AGV e Alcalinidade, de 12 de Março até ao momento passou a ser utilizado o FOS/TAC. Portanto a razão FOS/TAC é equivalente à razão AGV/ALCALINIDADE. Assim, para substituir a razão AGV/ALCALINIDADE pela variável FOS/TAC, foi necessário fazer uma análise comparativa dos valores AGV/ALCALINIDADE até Março 2013 com os valores de FOS/TAC de Março de 2013 até ao momento, utilizando como critério de comparação uma variação de cerca de 10% entre os valores, uma vez que os valores cumpriam o critério foi possível substituir a variável AGV/ALCALINIDADE por FOS/TAC. Assim sendo, realizaram-se novos treinos e testes de novas RNA com esta substituição, criando assim o segundo conjunto de redes.

Em seguida foi proposto adicionar outras variáveis para novos treino de RNA de forma a ver como as RNA se comportavam. Assim, o terceiro conjunto de RNA continha as mesmas variáveis de entrada do anterior conjunto acrescidas da CMV e TRH, sendo a variável de saída a mesma. Numa outra tentativa adicionaram-se mais variáveis e por isso o quarto conjunto contém as variáveis independentes do anterior conjunto adicionadas da MS (%) e MV/MS (%). Neste último conjunto de RNA obtiveram-se valores de erros de

zero, concluindo-se que possivelmente ocorreram erros na introdução de dados no programa, pelo que se optou por não considerar estas RNA. O Anexo V apresenta todos estes conjuntos de RNA.

Dos quatro conjuntos de RNA treinadas, selecionaram-se as que obtiveram o erro médio quadrático mais baixo, no primeiro conjunto o erro mais baixo era de 165,12, no segundo conjunto de 155,07, no terceiro conjunto de 180,94 e no quarto conjunto de 172,83. Destas RNA resultou o erro médio quadrático mais baixo de 155,07, contudo verificou-se a RNA parou devido a um dos critérios de paragem (o número de iterações). Treinou-se novamente esta RNA mas desta vez aumentando o número de iterações e verificou-se que o erro baixou para 154,36, com novos aumentos do número de iterações concluiu-se que o erro aumentava. Deste modo, treinou-se novamente a mesma RNA, sem considerar como critério de paragem o número de iterações, e obteve-se o erro mais baixo de 132,61 (Anexo V).

#### **6.1.5.3. Relatórios e gráficos do NeuralTools**

O NeuralTools cria relatórios resumidos e relatórios detalhados de treino, teste e previsão. Os relatórios resumidos contêm informações gerais sobre o teste ou treino. O relatório detalhado apresenta informações de cada caso individualmente, ao lado dos dados correspondentes. Além disso, a maioria das informações do relatório resumido podem ser encontradas no relatório detalhado, na forma de um comentário que é adicionado à célula-título; essa versão do relatório resumido é denominada resumo rápido. Estes relatórios de treino indicam como foi o desempenho da RNA treinada. Estatísticas como a % Previsões Inválidas mostram a quantidade de casos no treino definido para os quais a rede previu um valor de *output* diferente do verdadeiro valor conhecido. No Anexo IV estão representados exemplos de relatórios e gráficos produzidos pelo NeuralTools.

### 6.1.6. 6ª Fase - Previsão

O objetivo de usar RNA é fazer previsões. A melhor RNA treinada é usada para prever valores de novos casos nos quais os valores de *output* são desconhecidos. O NeuralTools oferece dois métodos de previsão:

- Método de previsão para valores desconhecidos da variável dependente de um conjunto de dados, através do comando de previsão do NeuralTools;
- Previsão Instantânea (somente na versão Industrial), em que os valores das variáveis independentes de determinado caso podem ser inseridos e o NeuralTools calcula automaticamente o valor de output previsto.

A caixa de diálogo previsão ajuda a definir o processo de previsão de valores para um grupo de casos de um conjunto de dados. Várias redes treinadas podem ser usadas para avaliar a diferença entre os valores previstos. Os valores de *output* previstos aparecem ao lado dos casos para os quais foi efetuada a previsão.

Na ETAR Norte os digestores de produção de biogás apresentam temperaturas que variam entre 32°C e 34°C, para estas temperaturas foram produzidos gráficos tridimensionais. Com estes gráficos pretende-se averiguar a melhor forma de obter a maior produção de biogás fazendo variar num eixo a percentagem de MV (%) e no outro o TRH (dias). Analisando os gráficos verifica-se que os que apresentam melhores resultados são os relativos às temperaturas de 33°C e 34°C, cuja produção de biogás é superior a 1500 m<sup>3</sup>/dia. Conclui-se portanto, que a RNA conseguiu aproximar-se do comportamento teórico do processo de DA, permitindo definir gamas de funcionamento ótimo. O Anexo VI contém estes gráficos de interpretação dos dados de previsão.

#### 6.1.7. 7ª Fase - Normalização

De acordo com Caldeira (2003), o problema central no desenho de modelos de dados relacionais é a forma de determinar quais são as relações necessárias. A teoria da dependência funcional, associada à normalização dos dados é a forma de ultrapassar este problema, facilitando o desenho do modelo de dados relacional. A normalização tem como propósito encontrar classes de relações, designadas por formas normais, que assegurem que o modelo de dados relacional consiga representar o sistema real.

A normalização é uma técnica formal que examina os dados, agrupando-os da melhor forma, facilitando futuras alterações e minimizando o impacto dessas mudanças no funcionamento do sistema. Este processo, que consiste na criação de uma forma normal, faz-se através da subdivisão das relações existentes noutras de menor grau e baseia-se na análise das dependências funcionais entre os atributos de todas as relações.

A fase de normalização de dados iniciou-se com a normalização de todas as variáveis da base de dados utilizada para modelação das RNA. Esta normalização consistiu em dividir todos os dados de cada variável pelo maior valor ocorrido no intervalo de tempo considerado para o caso em estudo. Os resultados obtidos com estas RNA normalizadas eram da ordem de zero, a razão destes resultados prendeu-se com o facto de o *output* (volume de biogás produzido no digestor I) estar normalizado. Com os resultados obtidos verificou-se que o *output* não deve ser normalizado e como tal estas RNA não foram consideradas corretas e úteis para o caso em estudo.

Numa fase seguinte, foi sugerido pelo orientador realizar uma nova fase de treinos e testes de RNA, apenas com normalização dos dados das variáveis independentes mantendo a variável dependente (*output* – volume de biogás produzido no digestor I). O processo de normalização experimentado não teve o efeito expectável, uma vez que não se verificaram melhorias do erro nas RNA. De acordo com o manual do NeuralTools, o programa já

possui um algoritmo incorporado que faz precisamente esta tarefa (normalização), de forma a evitar o efeito de atribuição de maior importância a variáveis com valores mais altos, pelo que se entendeu ser mais adequado aceitar essa capacidade já existente no programa e não usar a normalização que se tinha realizado. No Anexo VII estão disponíveis as tabelas de resultados das RNA.

## Capítulo 7.

### CONCLUSÕES

Em concordância com o que foi referido ao longo do presente trabalho, os consumos energéticos associados às operações de tratamento numa ETAR, são elevados. No sentido de ultrapassar esta dificuldade e aumentar a rentabilidade de exploração da ETAR, recorre-se à otimização do processo de DA cujo produto final é o biogás. A utilização desta fonte de energia renovável, com baixo custo associado, em vez de energias fósseis, apresenta vantagens económicas, ecológicas e ambientais.

O processo de DA é um processo complexo, do qual não se conhecem as relações existentes entre as variáveis intervenientes, assim como, qual o contributo efetivo de cada uma na produção de biogás, as RNA apresentam-se como uma ferramenta com grande potencial para a modelação deste processo, dadas as características que possuem.

Durante anos houve pouco interesse e sucederam poucos avanços no campo das RNA, sendo uma das causas desta estagnação a dificuldade de formalização destes modelos. Atualmente tem existido cada vez mais produção científica associada a pesquisas que utilizam RNA, pois estas encontram aplicações em diversas áreas da ciência, da economia e até mesmo da saúde. Esta ampla aplicabilidade das RNA deve-se ao fato, pelo menos em parte, das redes serem uma boa alternativa à solução de problemas nos quais não se conhece, ou pouco se conhece, da física do problema. Os métodos clássicos (métodos estatísticos), partem de um modelo numérico baseado na física do problema, que posteriormente é validado com dados observados, enquanto as RNA são baseadas diretamente nos dados observados.

As principais características que tornam desejável o estudo com recurso a RNA são: a capacidade de aprender através da experiência e a capacidade de se adaptar a situações adversas. A generalização, que está associada à capacidade da rede aprender

através de um conjunto relativamente reduzido de exemplos e posteriormente dar respostas coerentes para dados não conhecidos, é uma demonstração de que a capacidade das RNA vai muito além do simples mapear de relações de entrada e saída. Este é um ponto crucial para uma RNA pois nele se fundamenta a sua aprendizagem. Todos estes aspetos favorecem o estudo das RNA.

No entanto, as RNA também apresentam algumas dificuldades como sejam: definir o número de neurónios, de camadas escondidas, e o conjunto de dados de treino.

Apesar da ampla aplicabilidade das RNA, é importante ter em consideração que esta técnica não resolve todo o tipo de problemas. Refira-se, por exemplo, que no caso de fenómenos essencialmente aleatórios, para os quais não é possível encontrar nenhum modelo que permita descrever o seu comportamento sob condições arbitrárias, a única modelagem possível é a probabilística.

Das variáveis consideradas pertinentes para a modelação através de RNA do processo de DA da ETAR Norte, encontrou-se um conjunto com maior influência no processo e que permitiu obter a melhor rede - MV (%), caudal lama enviado ao digestor, temperatura entrada das lamas, pH e FOS/TAC. A partir do estudo efetuado foi possível ordenar, por ordem de importância, a relação entre cada variável e a otimização da produção de biogás. Da análise aos resultados obtidos para o caso de estudo, a melhor RNA é do tipo MLF e apresenta um erro médio quadrático de 132,61, a variável que mais influência teve foi a temperatura entrada das lamas no digestor. Conclui-se portanto que a metodologia proposta permitiu obter um bom ajustamento aos dados reais, para o período considerado.

Relativamente aos resultados finais e às conclusões dos outros trabalhos, que foram desenvolvidos em paralelo por outras empresas do grupo AdP, considerou-se mais correto

fazer-se essa troca de conclusões depois dos estagiários apresentarem e defenderem as suas teses.

O presente trabalho surge na sequência de um trabalho anteriormente realizado por um outro estagiário do ISEP, na ETAR Sul da SIMRIA, e do interesse de compreensão da complexidade do processo de DA bem como a sua otimização. Tal como se constatou no referido trabalho, também este não se encontra terminado, uma vez que poderão existir sempre desenvolvimentos futuros com possibilidade de melhorar o mesmo.

Conforme referido no presente relatório, a escassez de dados em variáveis que se apresentaram essenciais no processo das RNA, constituiu uma grande dificuldade. Deste modo, considerando que os custos de análise destes parâmetros não são significativos para a empresa, deste trabalho resultou a revisão do Plano Anual de Controlo Analítico da SIMRIA, com o aumento da frequência de determinação de vários parâmetros, nomeadamente do pH e da MV. Assim, sem acarretar custos adicionais significativos para a empresa, o responsável pela gestão da ETAR irá dispor de um conjunto de dados cada vez mais robusto, que contribuirá para a tomada de decisão, e, por outro lado permitirá em trabalhos futuros desta natureza a obtenção de melhores resultados.

Para desenvolvimentos futuros, sugere-se aplicar esta metodologia ao digestor II da ETAR Norte, ou aplicar a melhor rede obtida neste trabalho para tentar fazer a previsão de volume de biogás produzido para o digestor II.

A realização do presente estágio foi uma experiência muito gratificante e também de elevada importância, quer a nível pessoal quer a nível profissional. De salientar o bom ambiente de equipa, o apoio e entreaajuda entre os vários colaboradores que permitiu a fácil integração na empresa e na ETAR. Este estágio permitiu a aquisição de conhecimentos até então desconhecidos, permitiu a integração no mercado do trabalho com as implicações e responsabilidades que este representa.



Constituiu ainda, um desafio aliciante e suplementar, por se enquadrar numa temática, até aqui desconhecida, por não ter sido abordada na formação anterior, nem ser habitualmente abordada, porventura, na maioria dos cursos de Engenharia Civil. Além da componente técnica apreendida, este estágio realçou a importância de dois aspetos cada vez mais relevantes e explorados em ambiente profissional: a responsabilização e a gestão do tempo. Por um lado a necessidade de tomada de decisões ao longo do trabalho em ambiente de incerteza, e por outro a calendarização das tarefas e a gestão de prioridades, de forma a executar tudo com eficiência e eficácia. Como primeira experiência profissional, gostaria portanto de referir que o estágio foi positivo e foi um excelente culminar da minha formação superior.

## Capítulo 8.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**Alves M.M.S.,1998.** Estudo e Caracterização de Digestores Anaeróbios de Leito Fixo. Universidade do Minho. (Dissertação de Doutoramento).

**Caldeira C.P., 2003.** Normalização de base de dados. Universidade de Évora.

**Cavaleiro A.J.V.,1999.** Efeito de Sobrecargas de Ácido Oleico na Actividade de Consórcios Microbianos Anaeróbios Desenvolvidos em Processos de Leito Fixo. Universidade do Minho. (Dissertação de Mestrado).

**Florindo F.M.L.R.,2009.** Caracterização das Lamas Geradas e sua Valorização nos Subsistemas dos SMAS-Sintra. Delineamento de um Modelo Conceptual de Gestão. Universidade Técnica de Lisboa. (Dissertação de Mestrado).

**Gonçalves C.D.C.,2012.** Modelação do Processo de Digestão Anaeróbia da FORSU à Escala Industrial. Instituto Superior Técnico de Lisboa. (Dissertação de Mestrado).

**Härter F.P.,2007.** Redes Neurais Recorrentes Aplicadas à Assimilação de Dados em Dinâmica Não-linear. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Capítulo 3, pp. 55-70.

**Haykin S., 1999.** Neural Networks - A Comprehensive Foundation. Pearson Education. Singapura.

**Matos J.P.G.S.C., 2008.** Utilização de Redes Neurais Artificiais para a Modelação da Degradação de Sistemas de Distribuição de Água. Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa. (Dissertação de Mestrado).

**Mavioso J.F., 2010.** Tratamento de Águas Residuais através de Leitos de Macrófitas. Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa. (Dissertação de Mestrado).

**Moreira F.J.C., 2013.** Análise dos Problemas Associados ao Destino Final de Lamas em ETAR e Desenvolvimento de Metodologias para Otimização dos Processos Utilizados. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. (Dissertação de Mestrado).

**Moreira M.A., 1997.** Introdução às Redes Neurais.

**Moura I.N.S.C., 2012.** Opções de Tratamento de Águas Residuais por Sistemas Clássicos de Lamas Activadas numa Perspectiva de Minimização de Recursos Aplicados. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa. (Dissertação de Mestrado).

**Palisade, 2013.** NeuralTools - Add-In de Redes Neural para o Microsoft Excel. Manual do Utilizador. Versão 6. Palisade Corporation. Ithaca. N.Y.

**Pires A.F.F.E., 2009.** Contribuição para o Estudo de Avaliação do Desempenho de um Sistema de Estabilização Anaeróbia e Utilização do Gás Produzido. Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa. (Dissertação de Mestrado).

**Ribeiro J.V.B., 2013.** Capacidade de Nitrificação e Desnitrificação da ETAR Norte-SIMRIA. Universidade de Aveiro. (Dissertação de Mestrado).

**Rocha H.T.F., 2013.** Utilização de Redes Neurais Artificiais na Gestão de Processos de Digestão Anaeróbia. Instituto Superior de Engenharia do Porto. (Relatório de Estágio para Mestrado).

**Silva J.G., 2013.** Workshop sobre Utilização de Redes Neurais Artificiais em Empresa da Área do Saneamento Básico.

**SIMRIA, 2013.** Relatório e Contas 2013. SIMRIA - Saneamento Integrado dos Municípios da Ria, SA. Aveiro.

**Silveira G.S., 2009.** Estudo de Co-digestão Anaeróbia de Lamas Domésticas com o Efluente da Indústria da Fermentação da Levedura do Pão da Empresa Mauri Fermentos. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa. (Dissertação de Mestrado).

#### ***Sites da internet***

Consulta de dados da empresa na página oficial Águas de Portugal. In: <http://www.adp.pt/> (consultado em: 7 de Abril de 2014).

Consulta de dados da empresa na página oficial SIMRIA - Saneamento Integrado dos Municípios da Ria, SA. In: *<http://www.simria.pt/index.php>* (consultado em: 11 de Fevereiro de 2014).

# Anexos

Os anexos contêm imagens representativas dos ficheiros Excel.

Estes ficheiros completos serão entregues em formato digital, CD.

# **Anexo I**

Resultados Finais da 2ª Fase

Data	Lamas Espessada - NL8								Lama Digerida										
	Espessador I				Espessador II				Digestor I										
	pH	MS (%)	MV (%)	MV/MS (%)	pH	MS (%)	MV (%)	MV/MS (%)	pH	MS (%)	MV (%)	MV/MS (%)	Ácidos Gordos Voláteis (mg/L)	Alcalinidade (mg/L)	AGV/A = FOS/TAC	Caudal Lama (m3/dia)	TRH (dias)	Temp. Entrada Lamas (°C)	CMV
1-Jan-2010																236	27	33,85	
2-Jan-2010																287	22	33,40	
3-Jan-2010																169	38	33,50	
4-Jan-2010									7,3	2,30	1,4	0,61	270	1780	0,15	243	26	33,46	
5-Jan-2010																221	29	33,25	
6-Jan-2010									7,3	2,30	1,5	0,65	220	1920	0,11	301	21	34,01	
7-Jan-2010																285	23	33,34	
8-Jan-2010																280	23	33,87	
9-Jan-2010																394	16	34,00	
10-Jan-2010																393	16	33,94	
11-Jan-2010																393	16	33,72	
12-Jan-2010									7,0	2,40	1,6	0,67	230	1620	0,14	391	16	33,12	
13-Jan-2010																373	17	32,96	
14-Jan-2010									6,9	2,40	1,6	0,67	260	1700	0,15	325	20	32,99	
15-Jan-2010																390	16	32,85	
16-Jan-2010																390	17	32,87	
17-Jan-2010																389	17	32,74	
18-Jan-2010																388	17	32,97	
19-Jan-2010									7,1	2,50	1,60	0,64	140	1600	0,09	387	17	33,43	
20-Jan-2010																386	17	33,61	

Base de dados elaborada para treinar as RNA (parte 1).

Lama Digerida - NL4													Biogás					
		Digestor II																
Temp. Entrada Lamas (°C)	CMV	pH	MS (%)	MV (%)	MV/MS (%)	Ácidos Gordos Voláteis (mg/L)	Alcalinidade (mg/L)	AGV/A = FOS/TAC	Caudal Lama (m3/dia)	TRH (dias)	Temp. Entrada Lamas (°C)	CMV	Produzido Digestor I (m3/dia)	Produzido Digestor II (m3/dia)	CH4 (ppm)	CO2 (ppm)	O2 (%)	H2S (ppm)
33,85													1294					
33,40													1611					
33,50													1366					
33,46													1621					
33,25													1672					
34,01													1893					
33,34													2024					
33,87													1899					
34,00													2078					
33,94													1949					
33,72													1859					
33,12													1770					
32,96													1762					
32,99													1681					
32,85													1945					
32,87													1924					
32,74													1923					
32,97													1902					
33,43													1960					
33,61													2055					

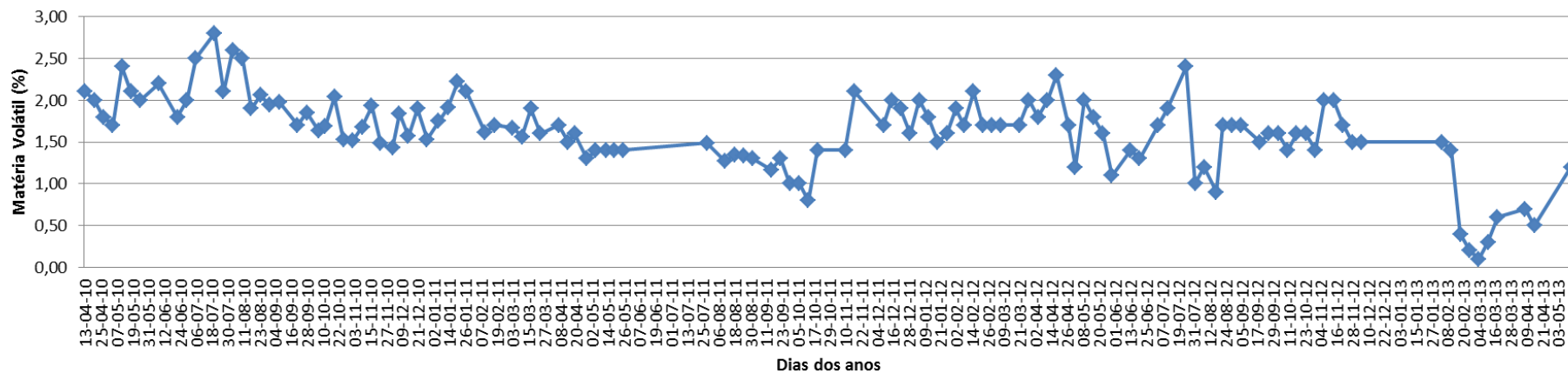
Base de dados elaborada para treinar as RNA (parte 2 - continuação).



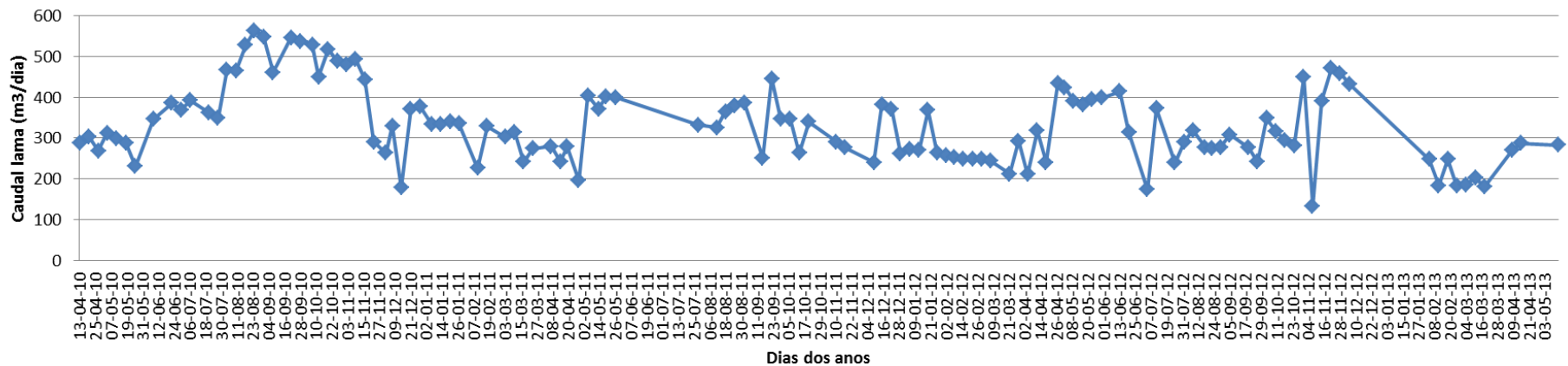
# **Anexo II**

Resultados Finais da 3ª Fase

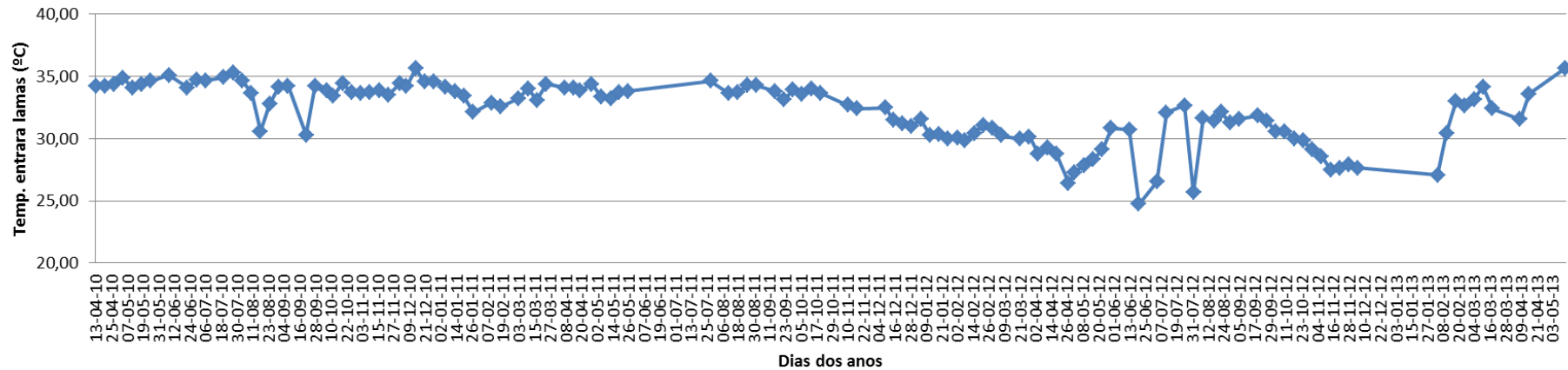
### MV (%)



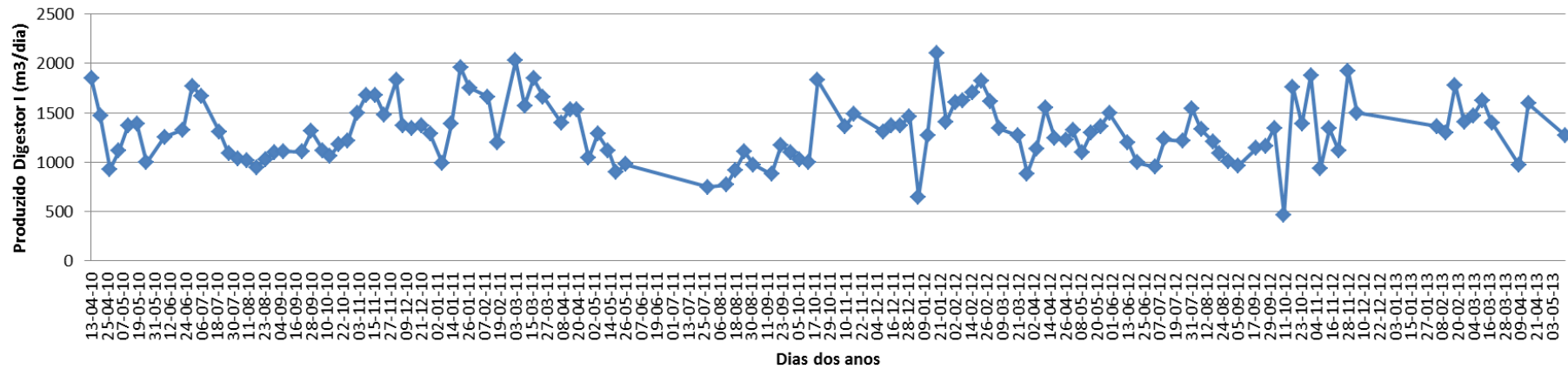
### Caudal Lama (m3/dia)



**Temp. Entrada Lamas (°C)**



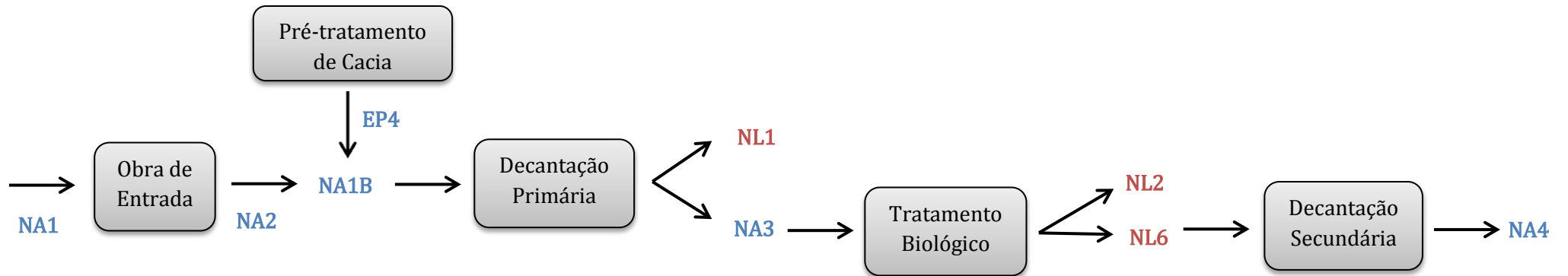
**Produtivo Digestor I (m3/dia)**



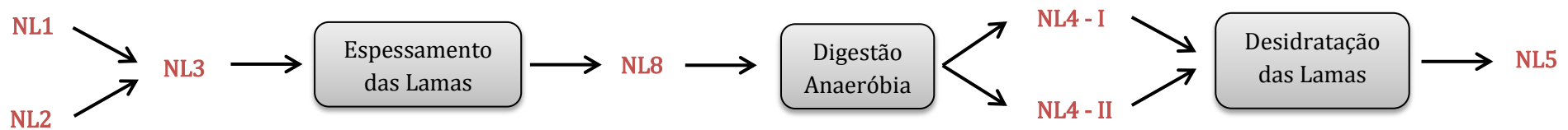
# **Anexo III**

Resultados Finais da 4ª Fase

### LINHA DE ÁGUA



### LINHA DE LAMAS



Esquemas da linha de água e linha de lamas da ETAR.

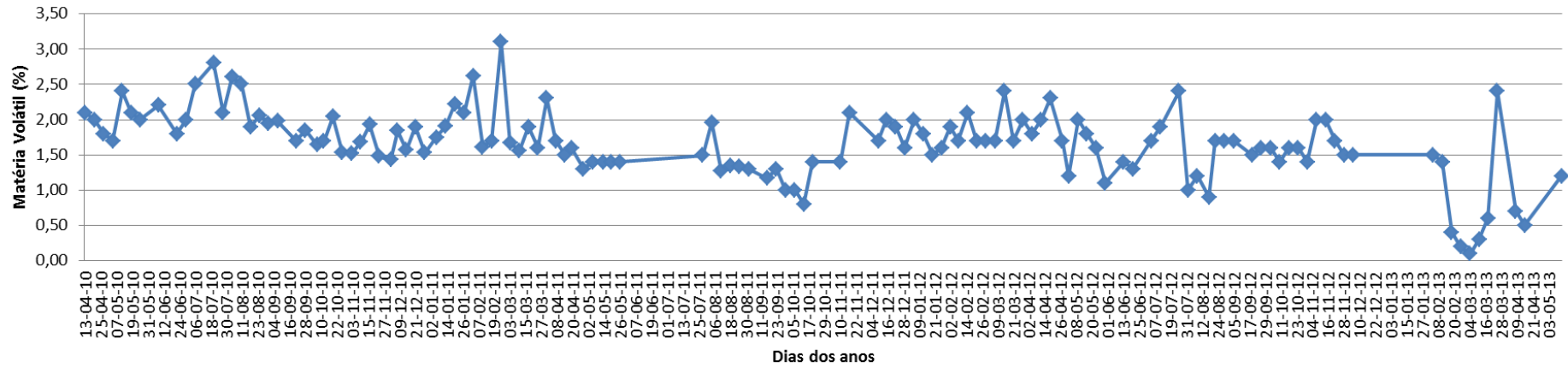
NL3 - Lamas Mistas			NL8 - Lamas Espessadas			NL4 - Lamas Digeridas		
Data	MV (%)	MS (%)	Data	MV (%)	MS (%)	Data	MV (%)	MS (%)
1 6-Abr-2010	1,90	2,70	6-Abr-2010	3,00	4,30	6-Abr-2010	1,80	2,80
2 1-Jun-2010	7,10	9,40	1-Jun-2010	3,00	4,40	1-Jun-2010	2,00	3,00
3 13-Jul-2010	2,30	3,20	13-Jul-2010	1,90	2,80	13-Jul-2010	2,80	3,80
4 14-Set-2010	1,81	2,69	14-Set-2010	1,33	1,82	14-Set-2010	1,71	2,49
5 3-Fev-2011	1,13	1,66	3-Fev-2011	2,62	3,57	3-Fev-2011	1,41	2,08
6 24-Fev-2011	0,80	1,18	24-Fev-2011	3,10	3,40	24-Fev-2011	1,23	1,89
7 31-Mar-2011	1,20	1,80	31-Mar-2011	2,30	3,10	31-Mar-2011	1,20	1,90
8 4-Ago-2011	1,10	1,70	4-Ago-2011	1,96	3,03	4-Ago-2011	1,01	1,69
9 8-Set-2011	0,06	0,51	8-Set-2011	2,30	3,14	8-Set-2011	1,05	1,72
10 27-Out-2011	0,30	0,80	27-Out-2011	2,50	4,00	27-Out-2011	1,10	1,90
11 3-Nov-2011	0,50	1,10	3-Nov-2011	0,10	0,70	3-Nov-2011	1,10	1,90
12 24-Nov-2011	1,60	2,10	24-Nov-2011	2,20	2,50	24-Nov-2011	1,20	2,00
13 2-Dez-2011	1,40	1,90	2-Dez-2011	0,10	0,70	2-Dez-2011	1,20	1,90
14 14-Mar-2012	2,30	3,30	14-Mar-2012	2,40	3,50	14-Mar-2012	1,30	2,10
15 27-Jun-2012	1,90	3,00	27-Jun-2012	2,20	3,40	27-Jun-2012	0,10	0,70
16 12-Dez-2012	1,20	2,00	12-Dez-2012	1,20	1,90	12-Dez-2012	1,00	1,80
17 19-Dez-2012	1,30	1,90	19-Dez-2012	2,10	2,50	19-Dez-2012	1,10	1,80
18 26-Dez-2012	1,60	2,20	26-Dez-2012	1,30	2,00	26-Dez-2012	1,10	1,80
19 2-Jan-2013	1,30	1,90	2-Jan-2013	1,20	1,70	2-Jan-2013	1,10	1,70
20 7-Jan-2013	1,40	2,20	7-Jan-2013	1,30	2,00	7-Jan-2013	1,00	1,70
21 14-Jan-2013	1,60	2,20	14-Jan-2013	1,60	2,40	14-Jan-2013	1,00	1,70
22 21-Jan-2013	1,50	2,20	21-Jan-2013	1,60	2,20	21-Jan-2013	1,00	1,70
23 28-Jan-2013	1,30	1,90	28-Jan-2013	1,60	2,20	28-Jan-2013	1,10	1,80
24 25-Mar-2013	0,90	1,30	25-Mar-2013	2,40	3,50	25-Mar-2013	0,80	1,50
25 1-Abr-2013	1,30	1,90	1-Abr-2013	0,10	0,30	1-Abr-2013	0,80	1,50

As linhas que se encontram sombreadas a amarelo simbolizam os *outliers* inicialmente eliminados que permaneceram eliminados após a segunda análise.

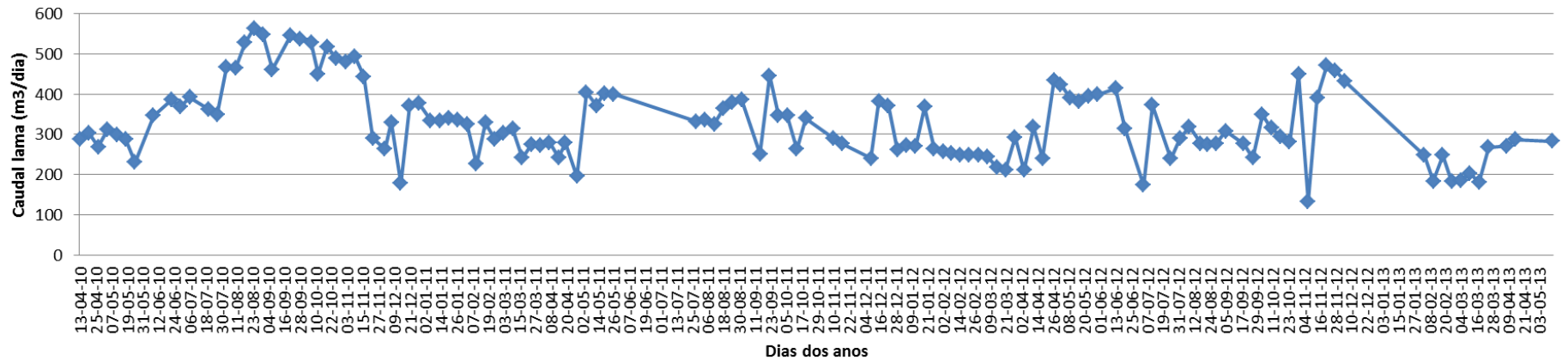
	Data	MV (%)	Caudal Lama (m3/dia)	Temp. Entrada Lamas (°C)	Produzido Digestor I (m3/dia)
1	3-Fev-2011	2,62	326	31,70	1659
2	24-Fev-2011	3,10	287	33,52	1368
3	31-Mar-2011	2,30	273	33,63	1393
4	4-Ago-2011	1,96	336	34,26	883
5	24-Nov-2011	2,20	268	32,57	0
6	14-Mar-2012	2,40	219	30,29	<b>Joana Brandão:</b> Avaria no Autómato - Queimou (9 dez.2012 a 31 jan.2013)
7	12-Dez-2012	1,20	419	0,00	
8	19-Dez-2012	2,10	456	0,00	
9	26-Dez-2012	1,30	433	0,00	
10	2-Jan-2013	1,20	423	0,00	1477
11	7-Jan-2013	1,30	416	0,00	1438
12	14-Jan-2013	1,60	427	0,00	1562
13	21-Jan-2013	1,60	210	0,00	1020
14	28-Jan-2013	1,60	333	0,00	1559
15	25-Mar-2013	2,40	268	32,68	1748

	Data	MV (%)	Caudal Lama (m3/dia)	Temp. Entrada Lamas (°C)	Produzido Digestor I (m3/dia)
1	3-Fev-2011	2,62	326	31,70	1659
2	24-Fev-2011	3,10	287	33,52	1368
3	31-Mar-2011	2,30	273	33,63	1393
4	4-Ago-2011	1,96	336	34,26	883
5	14-Mar-2012	2,40	219	30,29	1018
6	25-Mar-2013	2,40	268	32,68	1748

## MV (%)

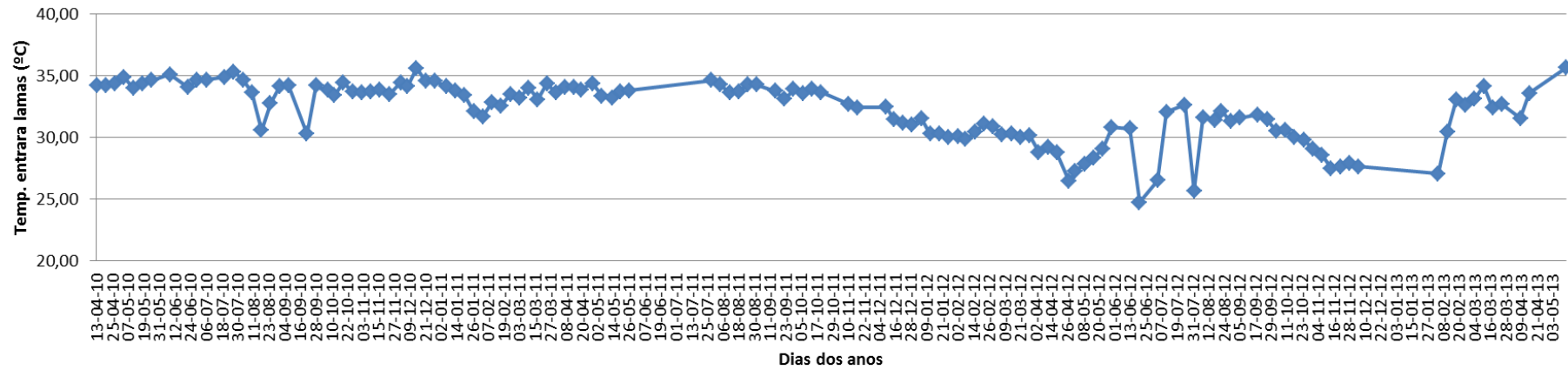


## Caudal Lama (m3/dia)

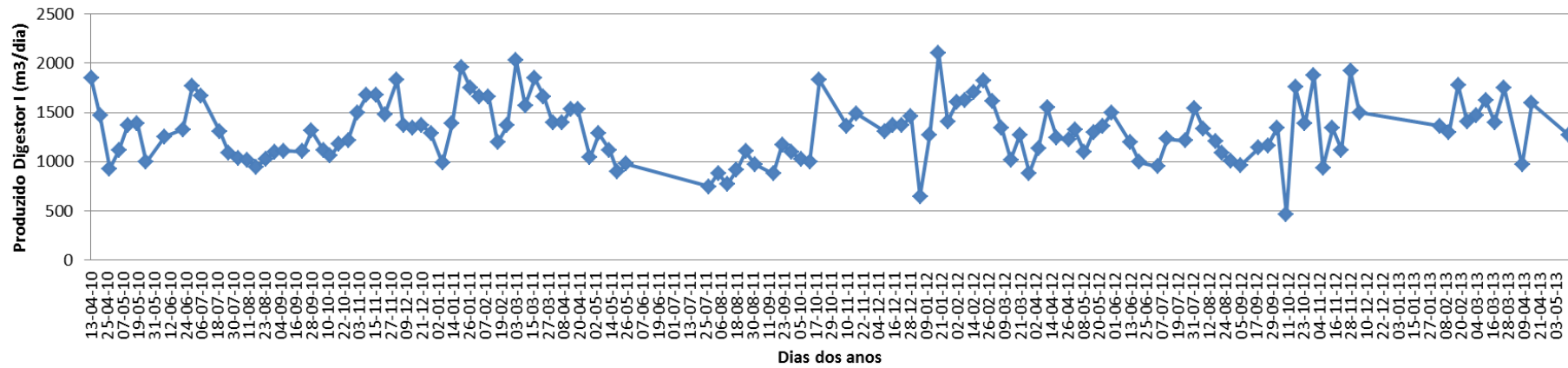




**Temp. Entrada Lamas (°C)**



**Produzido Digestor I (m3/dia)**



# Anexo IV

## Resultados Finais da 5ª Fase

Caixas de diálogo, relatórios e gráficos do  
NeuralTools

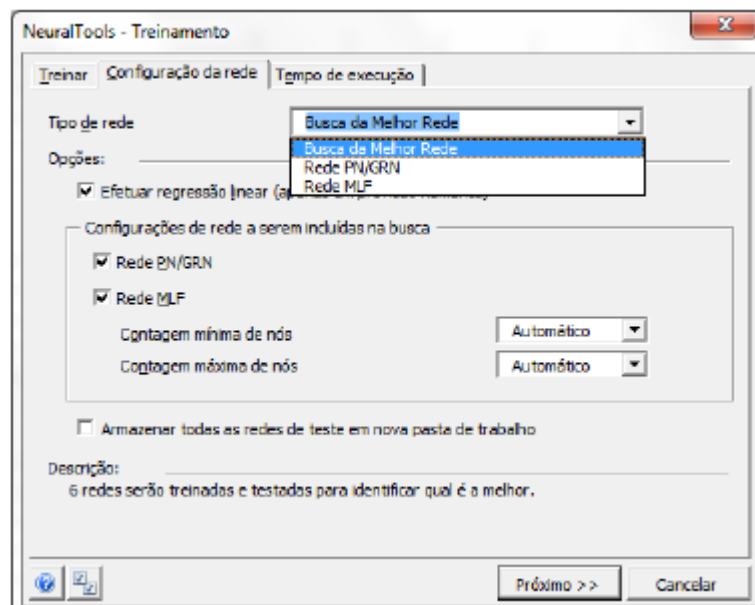


Figura 1 – Caixa de diálogo “Configuração da rede”.

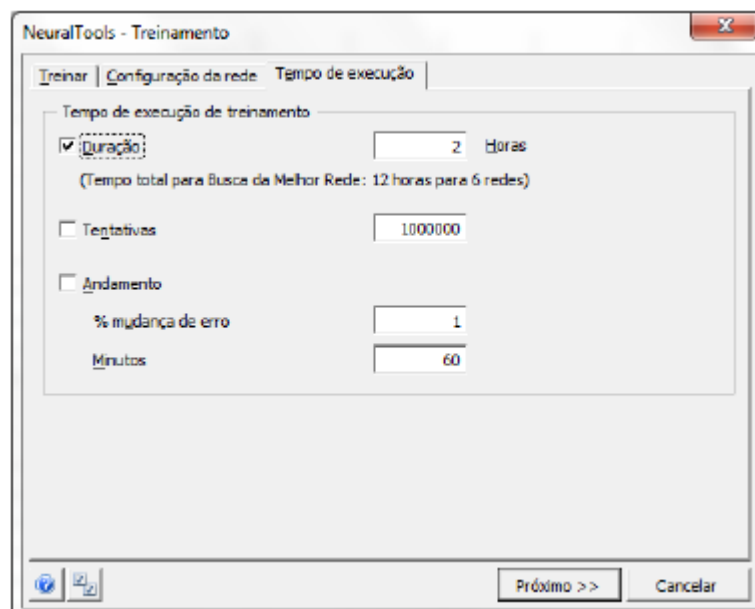


Figura 2 – Caixa de diálogo “Tempo de execução”.

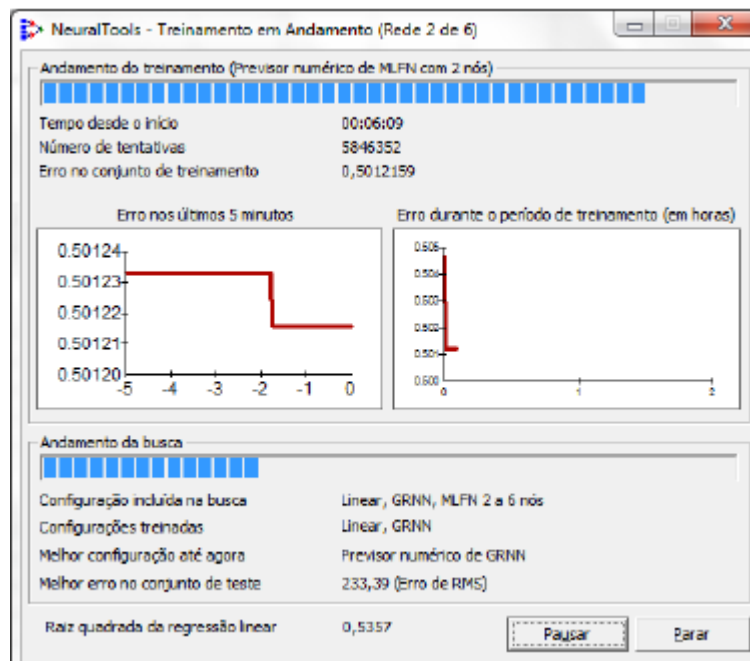


Figura 3 – Caixa de diálogo “Andamento do treino”.

# NeuralTools: Treinamento e Teste Automático de rede neural

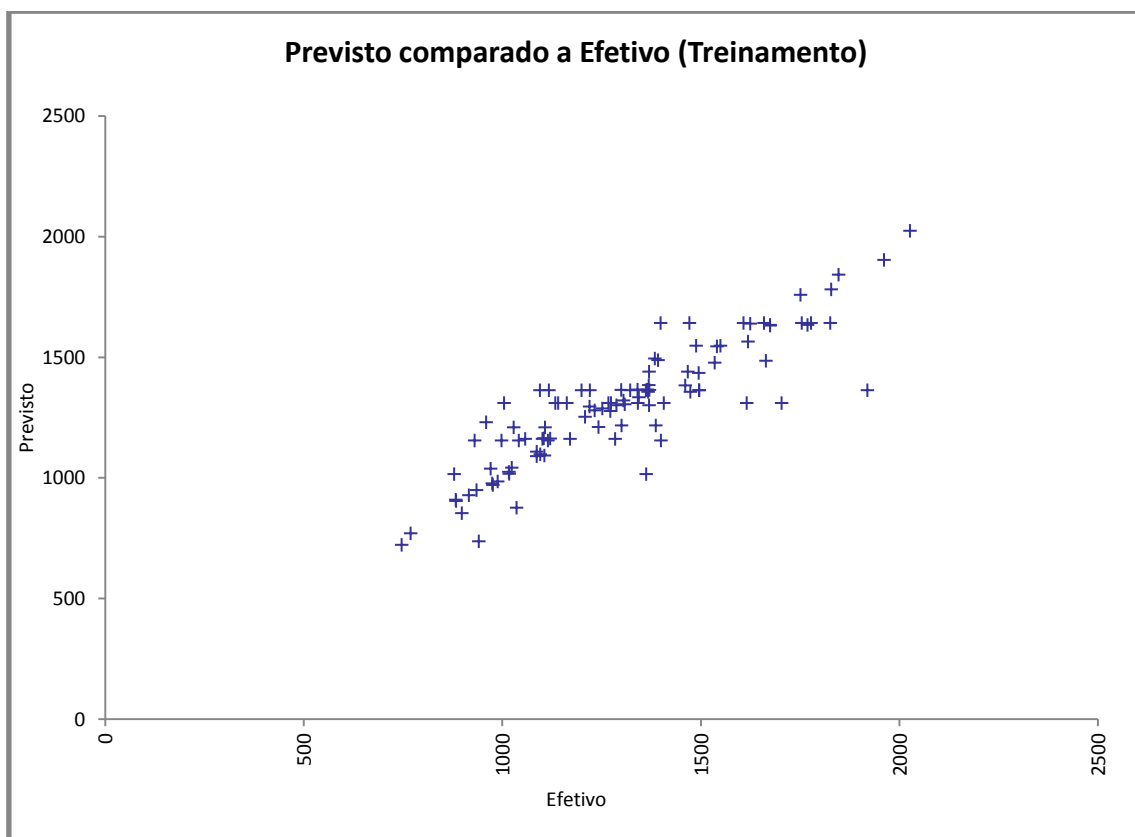
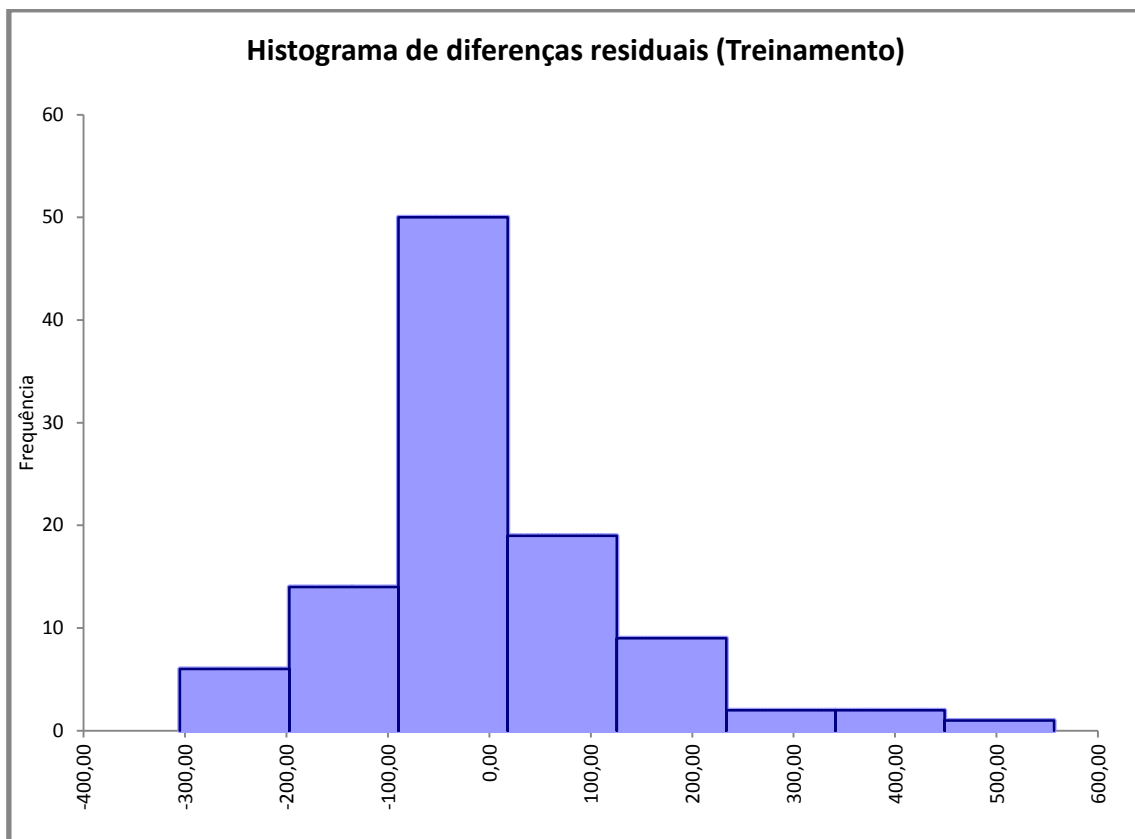
Executado por: Joana Brandão

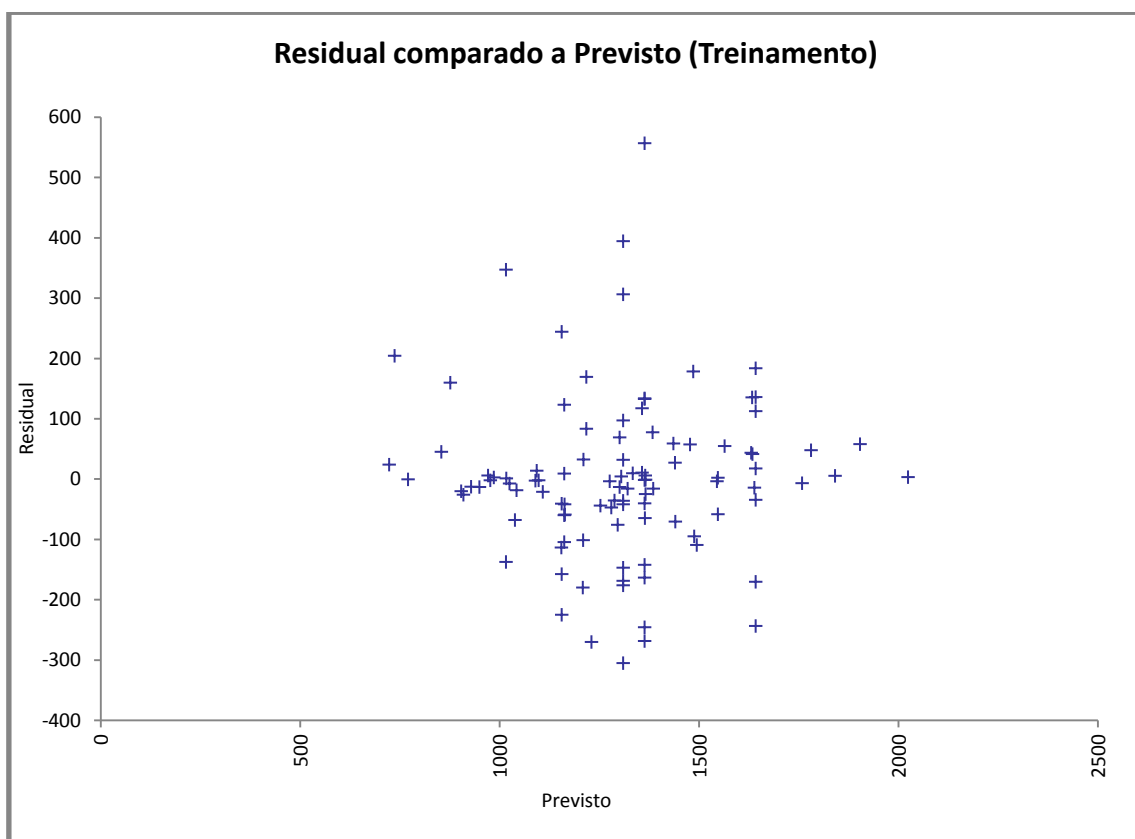
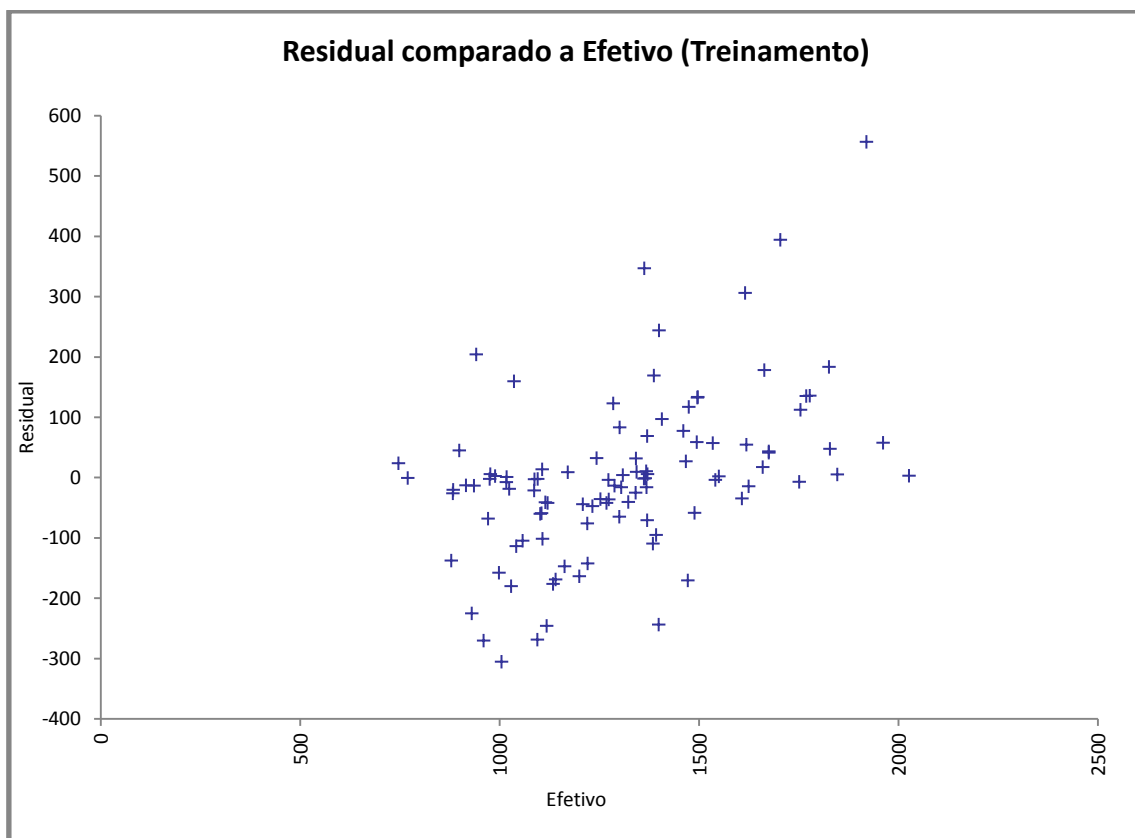
Data: segunda-feira, 28 de Julho de 2014 15:48:29

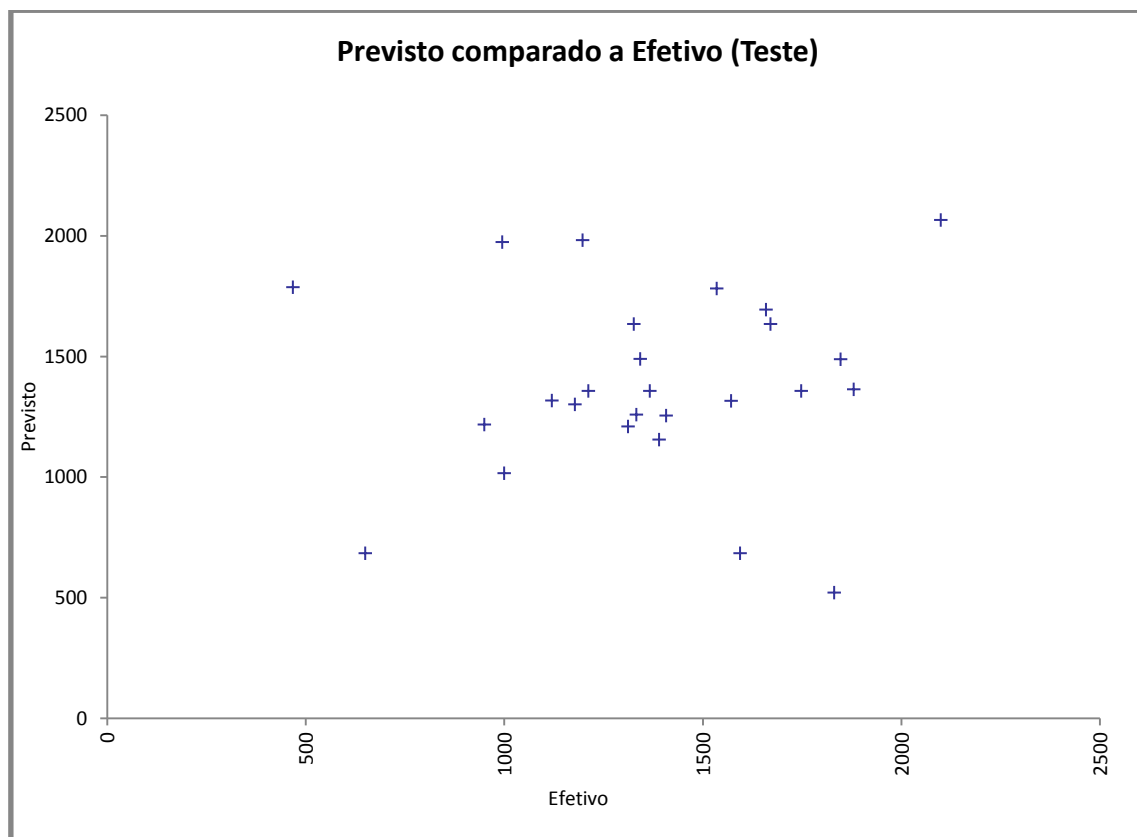
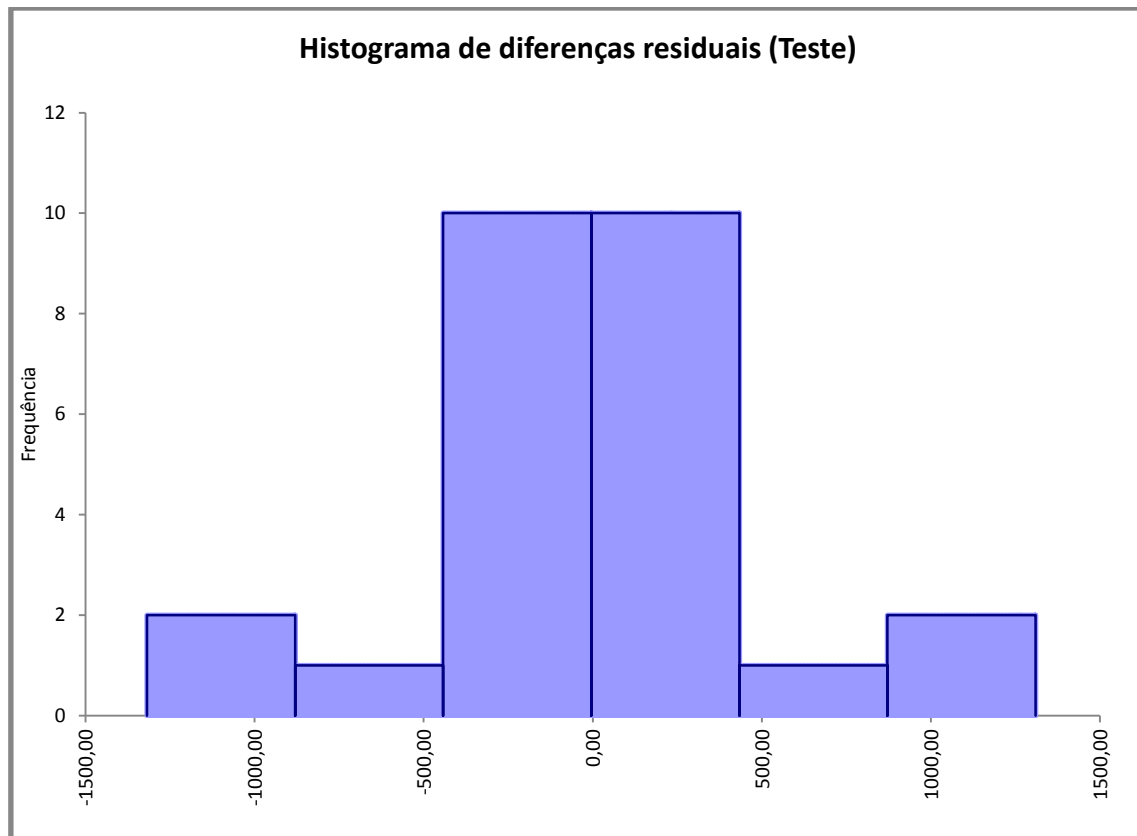
Conjunto de dados: Conjunto de dados núm. 1

Rede: Rede treinada em Conjunto de dados núm. 1

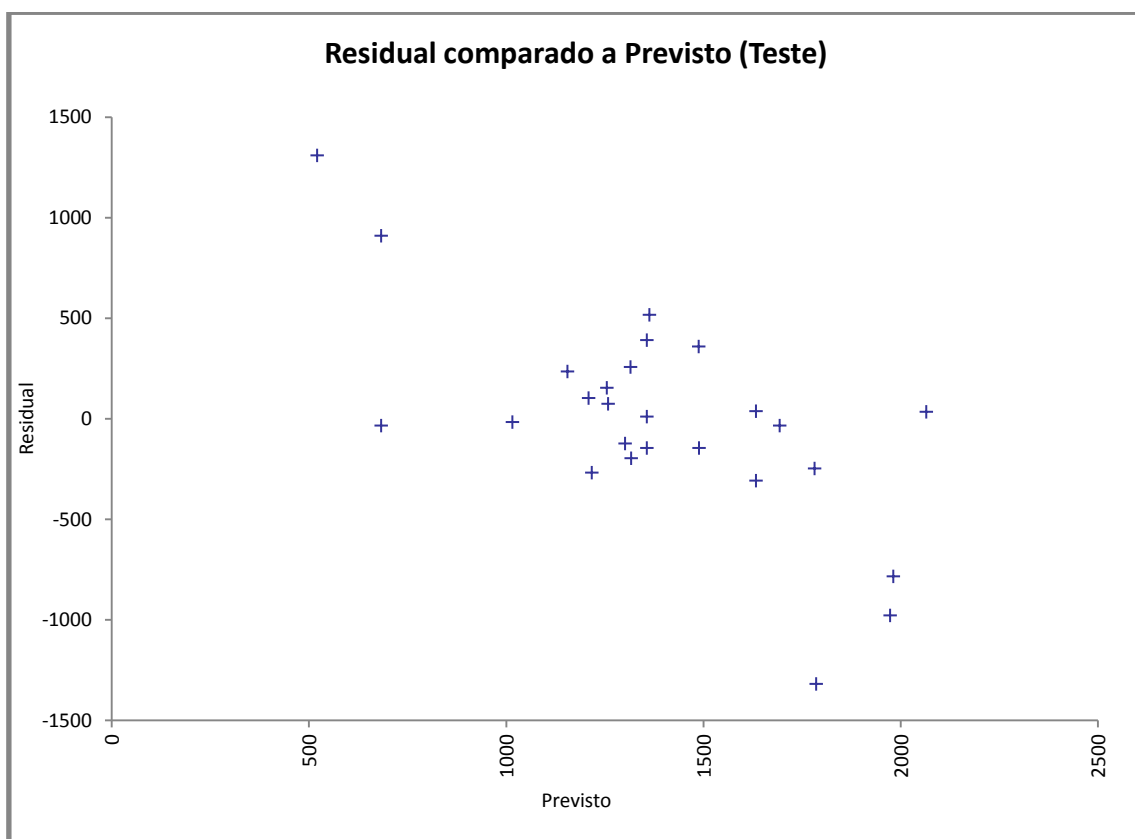
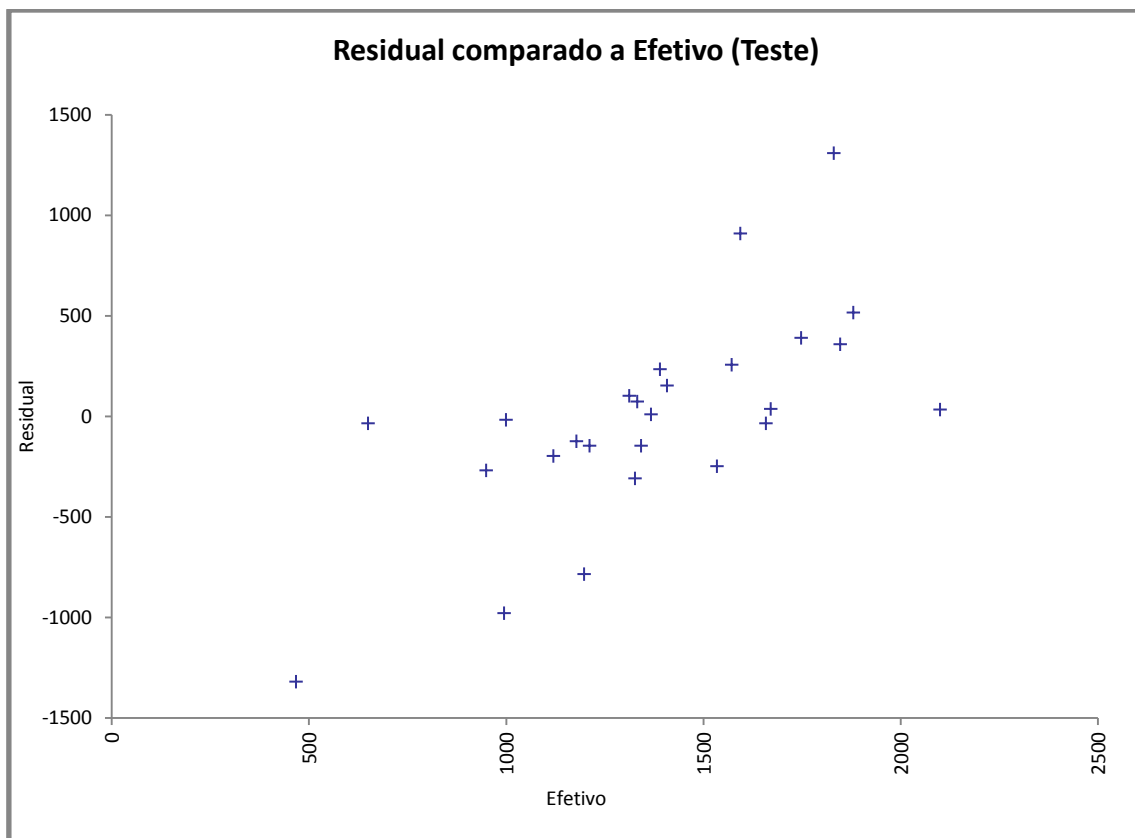
Resumo	
<b>Informações da rede</b>	
Nome	Rede treinada em Conjunto de dados núm. 1
Configuração	Previsor numérico de MLFN (6 nós)
Local	Esta pasta de trabalho
Variáveis categóricas independentes	0
Variáveis numéricas independentes	5 (MV (%), Caudal Lama (m3/dia), Temp. Entrada Lamas (°C), pH, AGV/ALC = FOS/TAC)
Variável dependente	Var. numérica (Produzido Digestor I (m3/dia))
<b>Treinamento</b>	
Número de casos	103
Tempo de treinamento	01:14:00
Número de tentativas	53740670
Motivo da parada	Parada automática
% previsões inadequadas (20% tolerância)	8,7379%
Erro médio quadrático	132,61
Erro médio absoluto	88,78
Desvio padrão de erro absoluto	98,50
<b>Teste</b>	
Número de casos	26
% previsões inadequadas (20% tolerância)	34,6154%
Erro médio quadrático	514,79
Erro médio absoluto	345,63
Desvio padrão de erro absoluto	381,50
<b>Conjunto de dados</b>	
Nome	Conjunto de dados núm. 1
Número de linhas	129
Tags de casos manuais	NÃO
<b>Análise de impacto de variáveis</b>	
Temp. Entrada Lamas (°C)	23,8657%
Caudal Lama (m3/dia)	21,8283%
pH	19,9160%
AGV/ALC	17,3167%
= FOS/TAC	
MV (%)	17,0733%

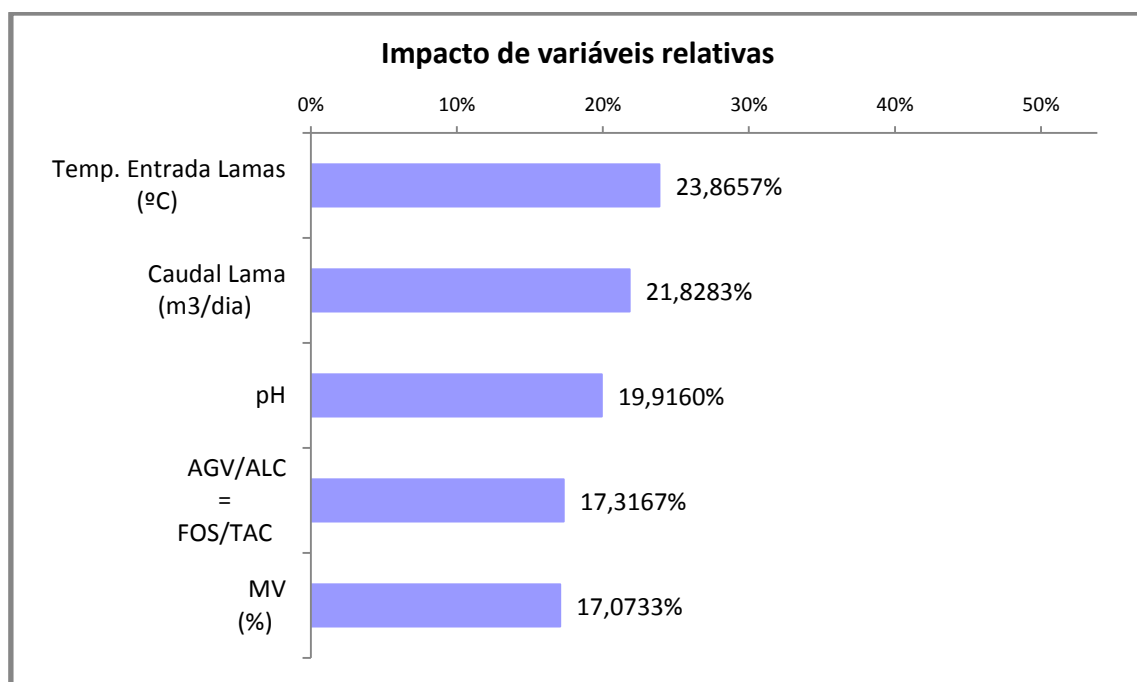












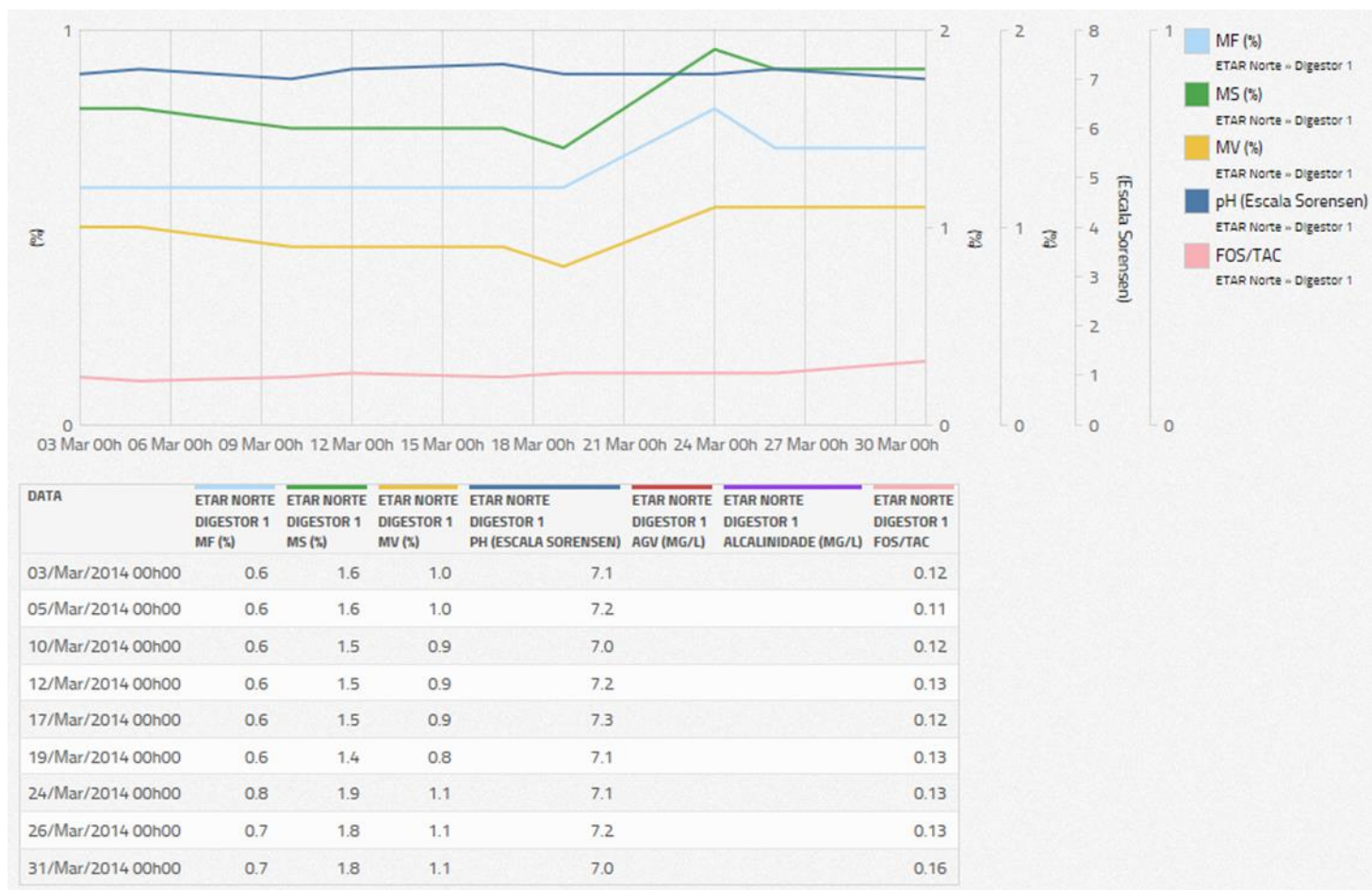
# Anexo V

## Resultados Finais da 5ª Fase

Resultados dos conjuntos de RNA

<b>Informações da rede</b>														
Nome	RN 1.0	RN 2.0	RN 3.0	RN 4.0	RN 5.0	RN 6.0	RN 7.0	RN 8.0	RN 9.0	RN 10.0	RN 11.0	RN 12.0	RN 13.0	RN 14.0
Configuração	GRNN	GRNN	GRNN	MLFN (4 nós)	GRNN	GRNN	GRNN	MLFN (5 nós)	GRNN	MLFN (2 nós)	GRNN	MLFN (2 nós)	MLFN (3 nós)	MLFN (4 nós)
Variáveis numéricas independentes consideradas e análise de impacto:														
- MV	41,40%	36,44%	30,04%	24,77%	34,54%	29,10%	41,73%	19,89%	25,71%	29,06%	25,57%	25,60%	22,75%	15,97%
- Caudal Lama	28,71%	26,07%	23,97%	24,91%	26,12%	29,90%		21,29%	21,43%	23,94%	12,69%	37,89%	21,31%	22,00%
- Temp. entrada lamas	29,89%	16,18%	12,95%	23,18%	16,25%		17,75%	20,16%	18,16%	17,50%	18,39%	36,51%	21,15%	23,33%
- pH		21,32%	17,60%	27,14%		20,96%	20,14%	16,04%	33,87%	29,50%	34,87%		24,05%	22,71%
- AGV			15,44%		23,09%	20,04%	20,38%	22,62%	0,82%		8,47%		10,74%	15,99%
Variáveis numéricas dependentes:														
- Produzido Digestor I (Biogás)	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
<b>Treinamento</b>														
Número de casos	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103
Número de tentativas	82	59	66	1000000	67	67	67	1000000	114	1000000	135	1000000	1000000	1000000
% previsões inadequadas	8,74%	8,74%	9,71%	3,88%	10,68%	10,68%	13,59%	5,83%	6,80%	14,56%	5,83%	14,56%	5,83%	8,74%
Erro médio quadrático	213,68	215,12	212,08	179,48	228,46	220,69	240,48	181,66	191,61	257,51	165,12	272,04	209,96	199,55
Erro médio absoluto	163,26	162,41	157,31	138,76	171,25	165,60	183,67	125,28	137,88	201,60	113,55	210,15	161,66	143,58
Desvio padrão de erro absoluto	137,86	141,07	142,24	113,83	151,22	145,88	155,24	131,54	133,06	160,20	119,88	172,74	133,98	138,58
<b>Teste</b>														
Número de casos	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26
% previsões inadequadas	23,08%	19,23%	19,23%	23,08%	19,23%	19,23%	23,08%	15,38%	15,38%	19,23%	23,08%	30,77%	26,92%	15,38%
Erro médio quadrático	385,47	362,87	365,97	362,42	383,72	362,61	375,17	361,13	279,19	299,21	281,71	306,49	389,81	288,34
Erro médio absoluto	291,00	272,99	273,32	275,54	285,23	263,58	289,69	287,06	232,47	231,91	217,90	247,23	323,00	258,27
Desvio padrão de erro absoluto	252,81	239,07	243,37	235,43	256,67	249,02	238,40	219,11	154,61	189,05	178,55	181,15	218,24	128,21

Primeiro conjunto de RNA treinadas com as variáveis MV, Caudal, Temperatura, pH e AGV.



<b>Informações da rede</b>															
Nome	RN 1.0	RN 2.0	RN 3.0	RN 4.0	RN 5.0	RN 6.0	RN 7.0	RN 8.0	RN 9.0	RN 10.0	RN 11.0	RN 12.0	RN 13.0	RN 14.0	RN 15.0
Configuração	GRNN	GRNN	GRNN	GRNN	GRNN	GRNN	MLFN (2 nós)	MLFN (3 nós)	GRNN	MLFN (4 nós)	MLFN (6 nós)	MLFN (3 nós)	GRNN	MLFN (2 nós)	MLFN (6 nós)
Variáveis numéricas independentes consideradas e análise de impacto:															
- MV	41,40%	36,44%	35,49%	40,60%	53,34%		28,50%	20,44%	17,43%	24,77%	21,03%	17,81%			21,01%
- Caudal Lama	28,71%	26,07%	26,52%	28,30%			33,48%	24,69%	29,22%	24,91%	18,27%	21,38%	51,62%	25,22%	18,35%
- Temp. entrada lamas	29,89%	16,18%	15,82%	14,09%	22,72%	100,00%	38,02%	19,81%	9,67%	23,18%	19,84%	19,18%		24,07%	19,80%
- pH		21,32%	21,35%		23,94%	0,00%		18,43%	29,89%	27,14%	22,23%	16,84%	48,08%	27,39%	22,22%
- AGV/ALC = (FOS/TAC)			0,83%	17,01%		0,00%		16,64%	13,79%		18,64%	24,79%	0,30%	23,32%	18,63%
Variáveis numéricas dependentes:															
- Produzido Digestor I (Biogás)	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
<b>Treinamento</b>															
Número de casos	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103
Número de tentativas	82	59	88	67	67	159	1000000	1000000	89	1000000	1000000	1000000	67	1000000	2000000
% previsões inadequadas	25,24%	20,39%	20,39%	28,16%	31,07%	38,83%	28,16%	20,39%	15,53%	17,48%	12,62%	20,39%	33,98%	28,16%	12,62%
Erro médio quadrático	213,68	215,12	215,34	234,14	241,98	283,20	236,08	206,12	188,63	179,48	155,07	210,11	262,00	233,56	154,36
Erro médio absoluto	163,26	162,41	162,51	178,88	186,63	230,10	189,27	162,42	139,20	138,76	109,95	152,94	209,52	192,33	108,98
Desvio padrão de erro absoluto	137,86	141,07	141,29	151,08	154,02	165,10	141,10	126,90	127,30	113,83	109,35	144,07	157,30	132,52	109,31
<b>Teste</b>															
Número de casos	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26
% previsões inadequadas	38,46%	34,62%	34,62%	34,62%	42,31%	46,15%	61,54%	34,62%	30,77%	53,85%	42,31%	57,69%	46,15%	50,00%	42,31%
Erro médio quadrático	385,47	362,87	363,92	385,82	383,57	380,88	429,66	386,73	364,28	362,42	360,93	370,35	380,45	381,84	361,93
Erro médio absoluto	291,00	272,99	273,58	288,67	298,70	299,05	360,54	287,72	260,36	275,54	291,56	297,77	291,34	294,31	293,26
Desvio padrão de erro absoluto	252,81	239,07	239,98	255,99	240,64	235,87	233,70	258,41	254,78	235,43	212,74	220,20	244,67	243,29	212,12

Segundo conjunto de RNA treinadas com as variáveis MV, Caudal, Temperatura, pH e substituição da variável AGV por AGV/ALC=FOS/TAC.

<b>Informações da rede</b>															
Nome	RN 1.0	RN 2.0	RN 3.0	RN 4.0	RN 5.0	RN 6.0	RN 7.0	RN 8.0	RN 9.0	RN 10.0	RN 11.0	RN 12.0	RN 13.0	RN 14.0	RN 15.0
Configuração	GRNN	GRNN	GRNN	GRNN	GRNN	MLFN (2 nós)	GRNN	GRNN	GRNN	GRNN	MLFN (3 nós)	MLFN (3 nós)	MLFN (3 nós)	MLFN (2 nós)	MLFN (3 nós)
Variáveis numéricas independentes consideradas e análise de impacto:															
- MV	29,77%		27,81%	33,82%	28,36%	27,83%	41,57%	28,16%	58,99%	32,53%	23,68%	24,25%	14,16%	34,59%	
- Caudal Lama	6,87%	17,51%	12,48%	24,01%	12,79%						18,87%	18,74%	20,00%	31,73%	21,65%
- Temp. entrada lamas	17,52%	13,95%	13,00%	15,93%	13,29%	32,11%	8,11%	16,94%	11,39%	31,28%		14,75%	13,53%		17,08%
- pH			16,53%	20,74%	16,66%								11,58%		23,17%
- AGV/ALC=FOS/TAC			0,62%	0,78%		17,20%			0,49%		16,60%		13,55%		
- CMV	45,83%	68,54%	12,32%	4,72%	12,29%		28,03%	43,88%		36,20%	35,17%	29,21%	11,69%	17,35%	17,30%
- TRH			17,23%		16,60%	22,85%	22,28%	11,01%	29,13%		5,68%	13,05%	15,49%	16,33%	20,81%
Variáveis numéricas dependentes:															
- Produzido Digestor I (Biogás)	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
<b>Treinamento</b>															
Número de casos	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103
Número de tentativas	82	73	87	94	60	44583430	63	66	103	74	3000000	3000000	8000000	8000000	8000000
% previsões inadequadas	28,16%	32,04%	22,33%	20,39%	22,33%	22,33%	31,07%	27,18%	29,13%	18,45%	22,33%	23,30%	11,65%	26,21%	20,39%
Erro médio quadrático	235,26	242,31	213,86	214,54	213,50	223,29	251,96	234,64	233,00	201,38	210,52	207,07	180,94	243,27	193,47
Erro médio absoluto	182,23	190,41	160,96	161,82	160,67	176,90	186,89	181,05	177,10	152,38	158,11	148,21	136,95	187,03	148,46
Desvio padrão de erro absoluto	148,79	149,86	140,81	140,87	140,59	136,25	168,98	149,25	151,40	131,65	139,00	144,60	118,25	155,57	124,05
<b>Teste</b>															
Número de casos	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26
% previsões inadequadas	46,15%	42,31%	38,46%	34,62%	38,46%	53,85%	38,46%	46,15%	42,31%	46,15%	46,15%	46,15%	34,62%	38,46%	38,46%
Erro médio quadrático	377,34	388,82	367,39	363,62	366,67	384,63	331,95	378,11	393,36	389,63	421,45	412,08	411,87	425,06	416,88
Erro médio absoluto	286,51	300,30	269,63	272,33	269,15	319,36	270,67	287,87	293,73	298,91	320,22	321,62	315,46	321,63	315,85
Desvio padrão de erro absoluto	245,56	246,99	249,54	240,94	249,01	214,36	192,15	245,15	261,64	249,92	274,01	257,62	264,80	277,90	272,08

Terceiro conjunto de RNA treinadas com as variáveis MV, Caudal, Temperatura, pH, FOS/TAC, CMV e TRH.

Informações da rede														
Nome	RN 1.0	RN 2.0	RN 3.0	RN 4.0	RN 5.0	RN 6.0	RN 7.0	RN 8.0	RN 9.0	RN 10.0	RN 11.0	RN 12.0	RN 13.0	RN 14.0
Configuração	GRNN	MLFN (3 nós)	MLFN (2 nós)	GRNN	MLFN (3 nós)	MLFN (3 nós)	GRNN	GRNN	MLFN (20 nós)	GRNN	MLFN (2 nós)	MLFN (2 nós)	GRNN	MLFN (3 nós)
Variáveis numéricas independentes consideradas e análise de impacto:														
- MV	11,37%	28,96%	18,53%	25,09%	12,65%		17,67%	19,87%	15,67%	19,39%	27,19%	24,61%	18,07%	24,01%
- Caudal Lama	12,11%	11,87%	32,77%	26,79%	9,97%	23,81%	13,22%	24,06%	13,52%	18,07%	27,99%	30,37%	17,78%	20,81%
- Temp. entrada lamas	12,19%	9,26%	31,52%	25,76%	8,61%	7,49%	15,92%	21,05%	12,13%	17,51%	25,62%	26,58%	11,26%	17,41%
- pH	12,15%				11,67%				12,48%				13,36%	24,01%
- AGV/ALC=FOS/TAC	11,48%				9,40%	8,51%			14,92%					
- CMV	12,19%				9,71%	12,44%			15,22%					
- TRH	11,38%	11,47%			8,29%	14,41%	11,81%							
- MS	8,00%	25,81%			17,08%	21,02%	41,38%	15,89%		45,03%	19,20%	18,44%	39,53%	13,76%
- MV/MS	9,12%	12,63%	17,18%	22,36%	12,61%	12,32%		19,13%	16,06%					
Variáveis numéricas dependentes:														
- Produzido Digestor I (Biogás)	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Treinamento														
Número de casos	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103
Número de tentativas	57	1000000	1000000	85	1000000	6000000	81	82	1000000	74	3000000	59635970	59	6000000
% previsões inadequadas	0,00%	21,36%	28,16%	0,00%	18,45%	22,33%	11,65%	0,00%	0,00%	16,50%	28,16%	28,16%	18,45%	18,45%
Erro médio quadrático	0,00	202,65	229,49	0,00	196,06	200,72	172,83	0,00	0,26	182,40	232,20	230,66	195,70	195,67
Erro médio absoluto	0,00	149,88	175,94	0,00	138,43	147,58	129,52	0,00	0,15	138,96	179,60	176,89	148,06	152,01
Desvio padrão de erro absoluto	0,00	136,40	147,34	0,00	138,84	136,04	114,43	0,00	0,21	118,14	147,18	148,04	127,98	123,21
Teste														
Número de casos	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26
% previsões inadequadas	46,15%	50,00%	57,69%	46,15%	57,69%	53,85%	46,15%	46,15%	69,23%	42,31%	57,69%	46,15%	38,46%	50,00%
Erro médio quadrático	379,33	428,79	515,75	375,58	465,08	443,83	384,05	375,58	826,27	381,38	499,18	431,37	362,18	413,01
Erro médio absoluto	296,80	342,20	401,10	302,35	368,38	367,17	284,98	302,35	685,07	281,54	390,17	331,50	271,43	320,36
Desvio padrão de erro absoluto	236,22	258,38	324,22	222,81	283,88	249,34	257,46	222,81	461,97	257,26	311,36	276,03	239,78	260,68

Quarto conjunto de RNA treinadas com as variáveis MV, Caudal, Temperatura, pH, FOS/TAC, CMV, TRH, MS, MV/MS.



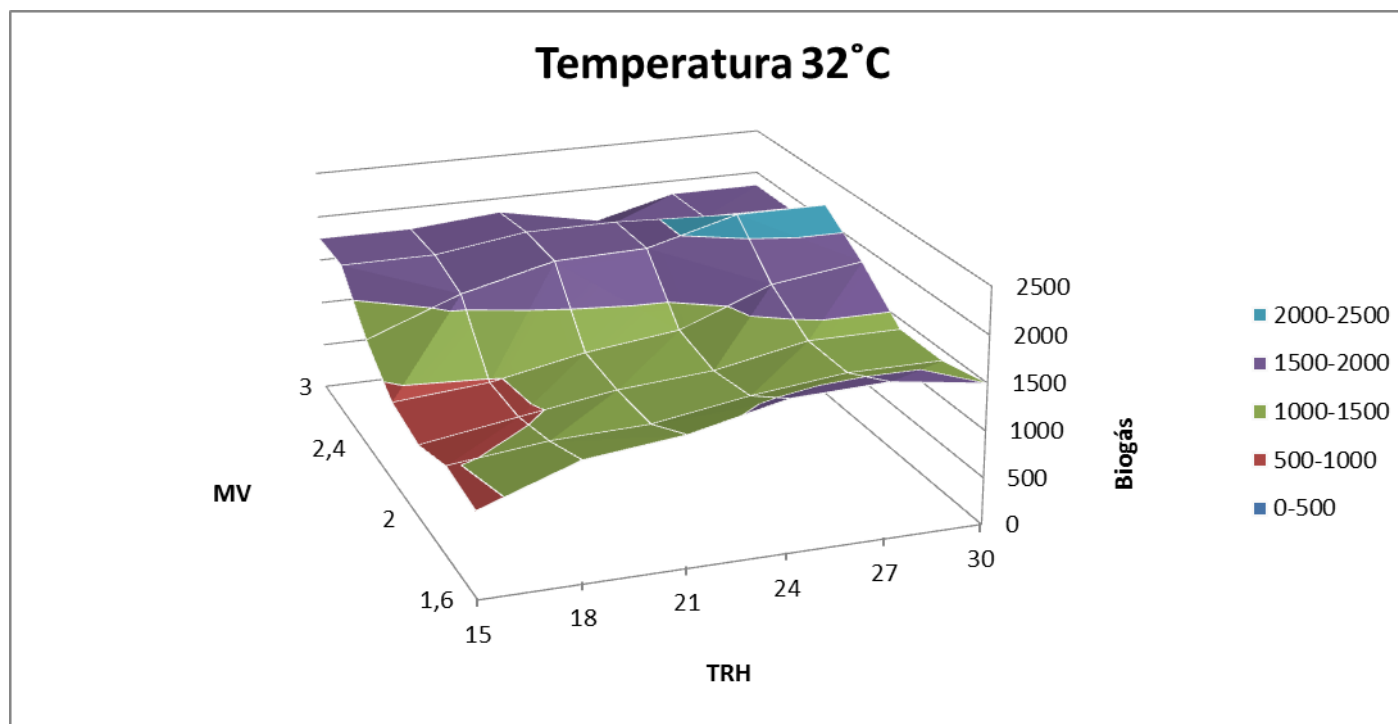
<b>Informações da rede</b>						
Nome	RN 1.0	RN 2.0	RN 3.0	RN 4.0	RN 5.0	RN 6.0
Configuração	MLFN (6 nós)	MLFN (6 nós)	MLFN (3 nós)	MLFN (3 nós)	MLFN (3 nós)	MLFN (6 nós)
Variáveis numéricas independentes consideradas e análise de impacto:						
- MV	21,03%	21,01%	29,34%	29,34%	22,23%	17,07%
- Caudal Lama	18,27%	18,35%	15,87%	15,87%	19,20%	21,83%
- Temp. entrada lamas	19,84%	19,80%	17,14%	17,14%	20,81%	23,87%
- pH	22,23%	22,22%	18,59%	18,59%	17,39%	19,92%
- AGV/ALC = (FOS/TAC)	18,64%	18,63%	19,06%	19,06%	20,36%	17,32%
Variáveis numéricas dependentes:						
- Produzido Digestor I (Biogás)	X	X	X	X	X	
<b>Treinamento</b>						
Número de casos	103	103	103	103	103	103
Número de tentativas	1000000	2000000	3000000	4000000	9000000	53740670
% previsões inadequadas	12,62%	12,62%	18,45%	18,45%	19,42%	8,74%
Erro médio quadrático	155,07	154,36	199,03	199,03	193,18	132,61
Erro médio absoluto	109,95	108,98	146,02	146,02	150,71	88,78
Desvio padrão de erro absoluto	109,35	109,31	135,24	135,24	120,86	98,50
<b>Teste</b>						
Número de casos	26	26	26	26	26	26
% previsões inadequadas	42,31%	42,31%	50,00%	50,00%	38,46%	34,62%
Erro médio quadrático	360,93	361,93	717,42	717,42	386,48	514,79
Erro médio absoluto	291,56	293,26	466,10	466,10	276,78	345,63
Desvio padrão de erro absoluto	212,74	212,12	545,38	545,38	269,73	381,50

Melhores RNA obtidas.

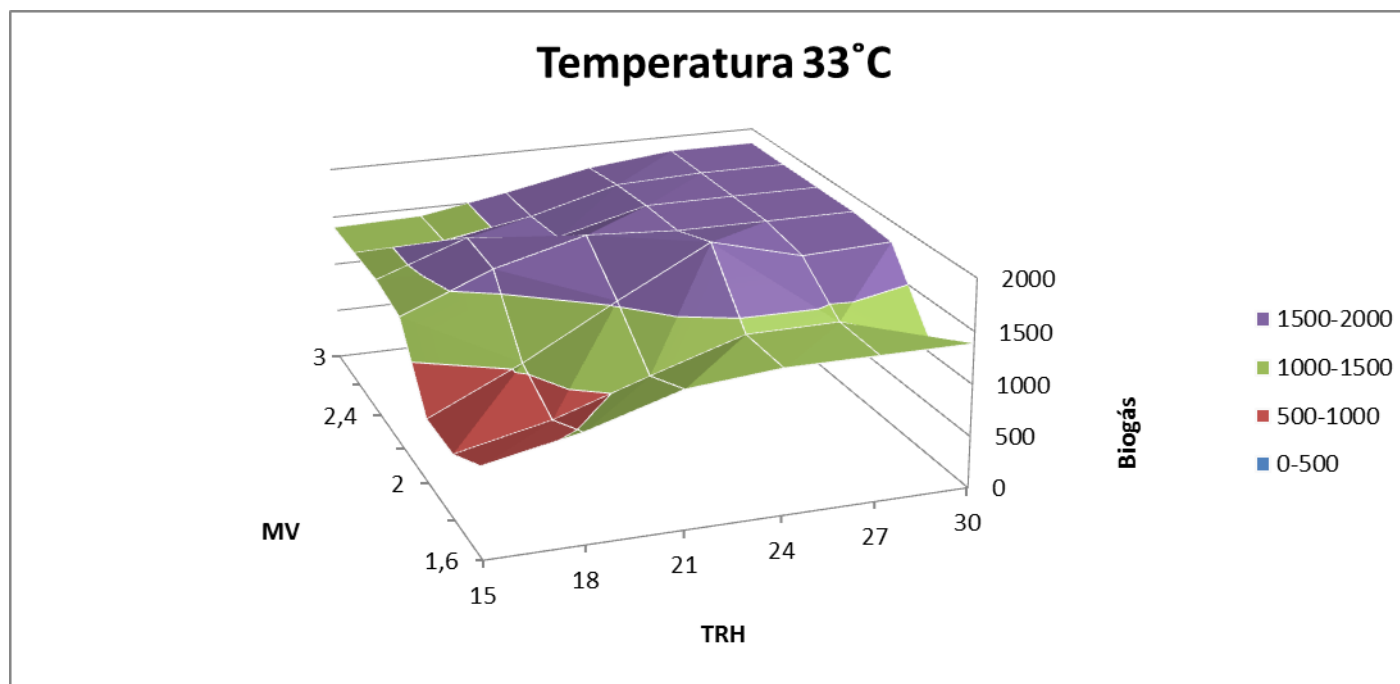
# **Anexo VI**

Resultados Finais da 6ª Fase

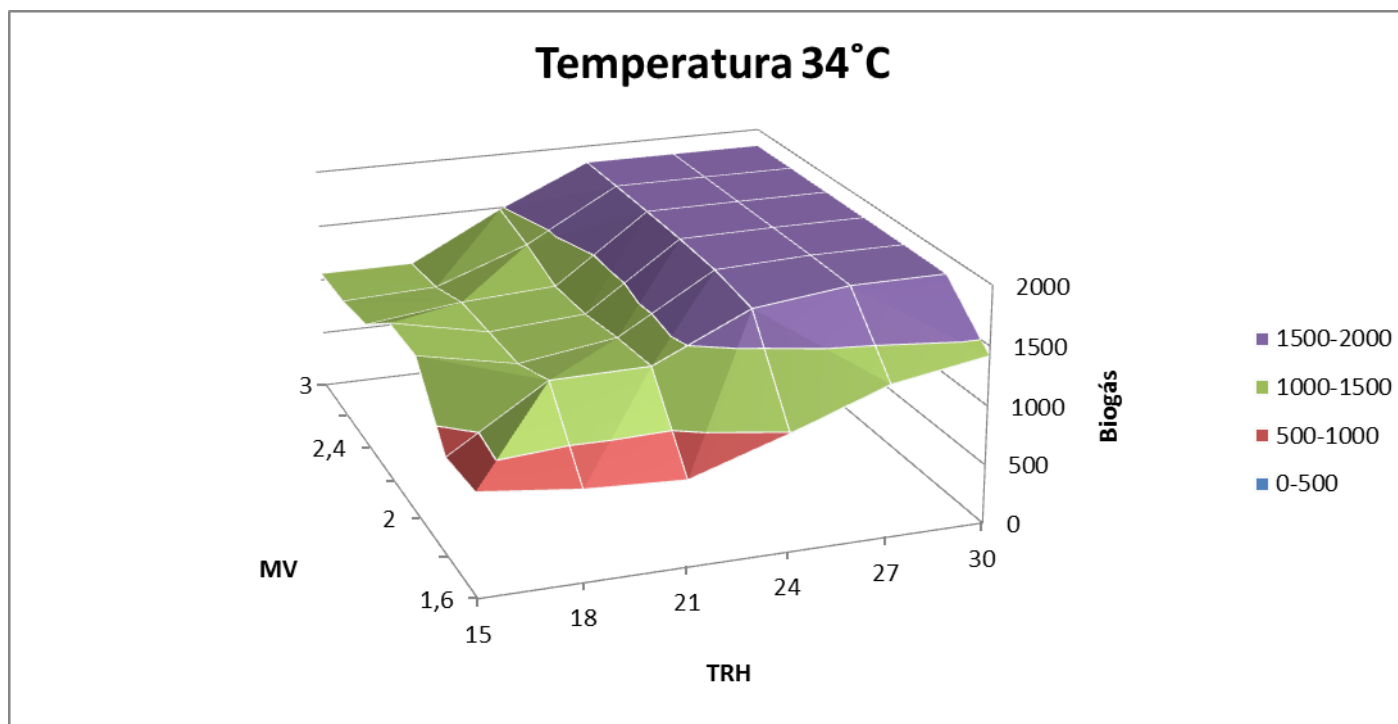
Data	MV (%)	Caudal Lama (m3/dia)	Temp. Entrada Lamas (°C)	pH	AGV/ALC = FOS/TAC	CMV	TRH	MS (%)	MV/MS (%)	Produzido Digestor I (m3/dia)
13/abr/2010	0,6774	0,5108	0,9605	0,9200	0,5537	0,4975	0,4652	0,5167	0,7041	1847
20/abr/2010	0,6452	0,5361	0,9605	0,9333	0,5383	0,4973	0,4375	0,5000	0,6929	1467
27/abr/2010	0,5806	0,4763	0,9632	0,9733	0,4512	0,3977	0,5000	0,4500	0,6929	931
4/mai/2010	0,5484	0,5536	0,9777	0,9600	0,4512	0,4365	0,4375	0,4333	0,6796	1115
11/mai/2010	0,7742	0,5308	0,9547	0,9200	0,3913	0,5908	0,4375	0,5667	0,7337	1367
18/mai/2010	0,6774	0,5113	0,9640	0,9333	0,3913	0,4980	0,4583	0,5833	0,6236	1390
25/mai/2010	0,6452	0,4091	0,9716	1,0000	0,5217	0,3795	0,5833	0,5000	0,6929	998
8/jun/2010	0,7097	0,6143	0,9847	0,9333	0,3478	0,6268	0,3958	0,5333	0,7146	1253
22/jun/2010	0,5806	0,6847	0,9556	0,9200	0,5652	0,5716	0,3542	0,5167	0,6035	1327
29/jun/2010	0,6452	0,6554	0,9728	0,9333	0,5652	0,6079	0,3542	0,5000	0,6929	1769
6/jul/2010	0,8065	0,6951	0,9724	0,9200	0,6087	0,8060	0,3333	0,5167	0,8382	1671
20/jul/2010	0,9032	0,6430	0,9790	0,9600	0,4783	0,8350	0,3750	0,6667	0,7276	1305
27/jul/2010	0,6774	0,6176	0,9907	0,9467	0,4783	0,6015	0,3750	0,5000	0,7276	1087
3/ago/2010	0,8387	0,8293	0,9726	0,9067	0,3913	1,0000	0,2917	0,5333	0,8445	1037
10/ago/2010	0,8065	0,8226	0,9441	0,8933	0,3478	0,9537	0,2917	0,5667	0,7642	1017
17/ago/2010	0,6129	0,9366	0,8574	0,9067	0,6522	0,8253	0,2500	0,4500	0,7314	941
24/ago/2010	0,6645	1,0000	0,9187	0,9200	0,4783	0,9554	0,2292	0,4850	0,7358	1029
31/ago/2010	0,6258	0,9727	0,9574	0,9200	1,0000	0,8752	0,2500	0,4650	0,7227	1102
7/set/2010	0,6387	0,8176	0,9603	0,9067	0,5652	0,7508	0,2917	0,4367	0,7855	1108
21/set/2010	0,5484	0,9689	0,8497	0,8933	0,5652	0,7640	0,2500	0,4100	0,7183	1107
28/set/2010	0,5968	0,9528	0,9595	0,9067	0,4348	0,8175	0,2500	0,4517	0,7095	1312
7/out/2010	0,5290	0,9355	0,9490	0,9200	0,6087	0,7116	0,2500	0,4183	0,6791	1120
12/out/2010	0,5452	0,7976	0,9379	0,9200	0,6522	0,6252	0,2083	0,4267	0,6861	1058
19/out/2010	0,6581	0,9190	0,9659	0,9333	0,3913	0,8695	0,2500	0,5000	0,7068	1178
26/out/2010	0,4935	0,8661	0,9447	0,9067	0,3913	0,6146	0,2708	0,4500	0,5890	1220
2/nov/2010	0,4903	0,8519	0,9435	0,9067	0,3913	0,6005	0,2708	0,4000	0,6583	1495
9/nov/2010	0,5419	0,8741	0,9461	0,9067	0,5217	0,6811	0,2708	0,4200	0,6929	1675
16/nov/2010	0,6226	0,7859	0,9496	0,9200	0,4783	0,7035	0,3125	0,4800	0,6965	1675
23/nov/2010	0,4774	0,5151	0,9393	0,9067	0,1739	0,3536	0,4583	0,3767	0,6806	1474
2/dez/2010	0,4613	0,4675	0,9661	0,9200	0,3043	0,3101	0,5000	0,4033	0,6142	1828
7/dez/2010	0,5935	0,5842	0,9586	0,9333	0,5217	0,4986	0,4167	0,4383	0,7272	1369



Gráficos de interpretação dos dados de previsão.



Gráficos de interpretação dos dados de previsão.



Gráficos de interpretação dos dados de previsão.

# **Anexo VII**

Resultados Finais da 7ª Fase

<b>Informações da rede</b>														
Nome	RN 1.0	RN 2.0	RN 3.0	RN 4.0	RN 5.0	RN 6.0	RN 7.0	RN 8.0	RN 9.0	RN 10.0	RN 11.0	RN 12.0	RN 13.0	RN 14.0
Configuração	GRNN	GRNN	GRNN	GRNN	GRNN	MLFN (3 nós)	GRNN, MLFN 2 a 6 nós	MLFN (3 nós)	MLFN (2 nós)	GRNN	MLFN (2 nós)	GRNN	GRNN	GRNN
Variáveis numéricas independentes consideradas e análise de impacto:														
- MV	27,81%	33,82%	35,49%	36,44%	41,40%	7,89%	33,82%	14,69%	27,85%	29,12%	20,88%	7,77%	28,34%	35,49%
- Caudal Lama	12,48%	24,01%	26,52%	26,07%	28,71%	14,33%	24,01%	23,38%	23,80%	30,76%	34,72%	14,61%	13,08%	26,52%
- Temp. entrada lamas	13,00%	15,93%	15,82%	16,18%	29,89%	15,78%	15,93%	21,26%	18,73%			16,09%	13,22%	15,82%
- pH	16,53%	20,74%	21,35%	21,32%		16,70%	20,74%		29,62%	26,76%	18,08%	9,26%	16,88%	21,35%
- AGV/ALC=FOS/TAC	0,62%	0,78%	0,83%			13,81%	0,78%					10,30%		0,83%
- CMV	12,32%	4,72%				13,97%	4,72%	20,17%		13,35%	26,32%	13,92%	11,62%	
- TRH	17,23%					17,52%		20,51%				10,73%	16,71%	
- MS												8,72%		
- MV/MS												8,61%	0,17%	
Variáveis numéricas dependentes: - Produzido Digestor I (Biogás)	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
<b>Treinamento</b>														
Número de casos	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103
Número de tentativas	87	94	88	59	82	4000000	94	1000000	4000000	61	1000000	56	69	88
% previsões inadequadas	22,33%	20,39%	20,39%	20,39%	25,24%	15,53%	20,39%	22,33%	30,10%	27,18%	31,07%	0,00%	22,33%	20,39%
Erro médio quadrático	0,1018	0,1022	0,1025	0,1024	0,1018	0,0890	0,1022	0,1027	0,1073	0,1104	0,1127	0,0000	0,1013	0,1025
Erro médio absoluto	0,0766	0,0771	0,0774	0,0773	0,0777	0,0637	0,0771	0,0739	0,0864	0,0854	0,0912	0,0000	0,0762	0,0774
Desvio padrão de erro absoluto	0,0671	0,0671	0,0673	0,0672	0,0656	0,0621	0,0671	0,0714	0,0636	0,0700	0,0661	0,0000	0,0668	0,0673
<b>Teste</b>														
Número de casos	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26
% previsões inadequadas	38,46%	34,62%	34,62%	34,62%	38,46%	46,15%	34,62%	38,46%	46,15%	42,31%	42,31%	46,15%	38,46%	34,62%
Erro médio quadrático	0,1749	0,1732	0,1733	0,1728	0,1836	0,1946	0,1732	0,1988	0,1927	0,1767	0,2017	0,1806	0,1746	0,1733
Erro médio absoluto	0,1284	0,1297	0,1303	0,1300	0,1386	0,1536	0,1297	0,1512	0,1405	0,1306	0,1520	0,1413	0,1281	0,1303
Desvio padrão de erro absoluto	0,1188	0,1147	0,1143	0,1138	0,1204	0,1195	0,1147	0,1291	0,1319	0,1190	0,1327	0,1125	0,1187	0,1143

Resultados da normalização de todas as variáveis da base de dados.



<b>Informações da rede</b>													
Nome	RN 1.0	RN 2.0	RN 3.0	RN 4.0	RN 5.0	RN 6.0	RN 7.0	RN 8.0	RN 9.0	RN 10.0	RN 11.0	RN 12.0	RN 13.0
Configuração	GRNN	GRNN	GRNN	GRNN	GRNN	GRNN	GRNN	GRNN	MLFN (3 nós)	MLFN (3 nós)	MLFN (2 nós)	MLFN (3 nós)	MLFN (3 nós)
Variáveis numéricas independentes consideradas e análise de impacto:													
- MV	11,37%	1,91%	27,81%	33,82%	35,49%	36,44%	11,39%	33,82%	15,23%	20,46%	25,61%	10,77%	20,50%
- Caudal Lama	12,11%	0,51%	12,48%	24,01%	26,52%	26,07%	17,07%	24,01%	20,16%	18,53%	25,97%	19,03%	18,53%
- Temp. entrada lamas	12,19%	7,98%	13,00%	15,93%	15,82%	16,18%		15,93%	15,79%	22,53%	18,38%	17,83%	22,49%
- pH	12,15%	10,99%	16,53%	20,74%	21,35%	21,32%	12,18%	20,74%		19,78%	30,04%		19,81%
- AGV/ALC=FOS/TAC	11,48%	0,19%	0,62%	0,78%	0,83%		11,45%	0,78%	7,96%	18,69%		13,86%	18,67%
- CMV	12,19%	24,84%	12,32%	4,72%			8,84%	4,72%	14,50%			20,35%	
- TRH	11,38%	16,46%	17,23%						11,88%				
- MS	8,00%	37,12%					39,06%					18,16%	
- MV/MS	9,12%								14,47%				
Variáveis numéricas dependentes:													
- Produzido Digestor I (Biogás)	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
<b>Treinamento</b>													
Número de casos	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103
Número de tentativas	57	105	87	94	88	59	67	94	2000000	32791878	2000000	29660978	72965922
% previsões inadequadas	0,00%	3,88%	22,33%	20,39%	20,39%	20,39%	19,42%	20,39%	25,24%	18,45%	29,13%	22,33%	18,45%
Erro médio quadrático	0,00	134,45	213,86	214,54	215,34	215,12	205,16	214,54	210,95	188,74	225,10	201,78	188,92
Erro médio absoluto	0,00	95,70	160,96	161,82	162,51	162,41	155,42	161,82	158,48	145,14	181,22	154,74	145,82
Desvio padrão de erro absoluto	0,00	94,43	140,81	140,87	141,29	141,07	133,93	140,87	139,23	120,65	133,52	129,51	120,12
<b>Teste</b>													
Número de casos	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26
% previsões inadequadas	46,15%	46,15%	38,46%	34,62%	34,62%	34,62%	42,31%	34,62%	50,00%	38,46%	46,15%	38,46%	38,46%
Erro médio quadrático	379,33	394,18	367,39	363,62	363,92	362,87	376,68	363,62	434,92	377,58	404,31	406,67	378,63
Erro médio absoluto	296,80	297,01	269,63	272,33	273,58	272,99	276,37	272,33	344,32	274,66	294,16	304,56	275,11
Desvio padrão de erro absoluto	236,22	259,16	249,54	240,94	239,98	239,07	255,95	240,94	265,71	259,09	277,38	269,49	260,14

Resultados da normalização de todas as variáveis da base de dados, expeto do *output* (biogás).